



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería de la energía

**ESTUDIO ENERGÉTICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE
DIFERENTES TECNOLOGÍAS PARA LA TRACCIÓN
FERROVIÁRIA**



Memoria escrita

Autor:	David Marín Lozano
Director:	José López López
Co-Director:	Jordi Garriga Turu
Convocatoria:	junio 2020

Resum

Actualment el transport de persones o mercaderies mitjançant línies ferroviàries és un sector en continu creixement però que porta anys sense ser actualitzat en temes de la tracció dels trens.

En el treball es troben les bases de funcionament d'un simulador que s'ha usat per a verificar els funcionaments teòrics i obtenir resultats amb els quals després es treballaran les conclusions.

A més, gràcies a aquests resultats trobem tres estudis diferents: Un estudi energètic en quant a energia o combustible consumit en les diferents simulacions; Un estudi ambiental, tant d'emissions com d'impacte ambiental de totes les simulacions i un estudi econòmic que resumeix els costos associats a cada tipus de transport ferroviari.

Finalment, es fan les conclusions globals del treball i l'anàlisi econòmica de la realització d'aquest.

Resumen

Actualmente el transporte de personas o mercancías mediante líneas ferroviarias es un sector en continuo crecimiento pero que lleva años sin ser actualizado en temas de la tracción de los trenes.

En el trabajo se encuentran las bases de funcionamiento de un simulador que se ha usado para verificar los funcionamientos teóricos y obtener resultados con los que luego se trabajarán las conclusiones.

Además, gracias a estos resultados encontramos tres estudios diferentes: Un estudio energético, en cuanto a energía o combustible consumido en las distintas simulaciones; Un estudio ambiental, tanto de emisiones como de impacto ambiental de todas las simulaciones y un estudio económico que resume los costes asociados a cada tipo de transporte ferroviario.

Por último, se hacen las conclusiones globales del trabajo y el análisis económico de la realización del mismo.

Abstract

Nowadays the transport of persons or cargoes by means of rail lines is a sector at continual growth but that takes years without being updated at motifs of the drive of the rails.

At this project, we can find the bases of operation of a simulator that has been used to verify the theoretic operations and obtain results with which next we will work on the conclusions.

Besides, thanks to these results find three distinct surveys: An energetic survey at regarding energy or fuel consumed at the distinct simulations; An ambient survey, so much of emissions and of ambient impact of all the simulations and an economic survey that summarises the costs associated at each type of rail transport.

Finally, we find the global conclusions of the work and the economic analysis of the realisation of this.



Agradecimientos

En primer lugar, agradecer tanto a mi tutor del trabajo de la universidad, José López, como a mi tutor en la empresa, Jordi Garriga, por guiarme en este camino, ayudarme y facilitarme al máximo la realización del proyecto.

En segundo lugar, a la gente que ha estado conmigo apoyándome día a día, y que me han hecho más amena tanto la cuarentena por la que acabamos de pasar como el proceso de creación del presente trabajo; Éstos son: Mi madre, padre y hermano, Mi pareja y mis amigos, todos ellos muy importantes en mi vida, incluso esenciales.

Y en tercer lugar no podía faltar agradecer tanto a la universidad en sí como a la empresa por prestar las facilidades que he necesitado sin poner ningún tipo de obstrucción al aprendizaje i/o a la investigación.



Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
1. PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo	1
1.2. Motivación	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del trabajo.....	3
2.2. Abasto del trabajo.....	3
3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE USADO EN LA SIMULACIÓN	5
3.1. OpenTrack	6
3.1.1. Descripción general	6
3.1.2. Datos de entrada y modelado.....	6
3.1.3. Resultados	8
3.2. OpenPowerNet	10
3.2.1. Descripción general	10
3.2.2. Datos de entrada y modelado.....	11
3.2.3. Resultados	15
4. ESTUDIO ENERGÉTICO DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS PARA LA TRACCIÓN FERROVIARIA	19
4.1. Identificación de las tecnologías y tipos de servicio.....	19
4.1.1. Identificación de las tecnologías	19
4.1.2. Identificación de los tipos de servicio	21
4.2. Criterios de diseño y modelado para cada tecnología	23
4.2.1. Tracción eléctrica.....	23
4.2.2. Tracción con combustible diésel o GLP.....	23
4.2.3. Tracción con baterías	23
4.2.4. Tracción con pilas de hidrógeno	24
4.3. Discusión y optimización de las simulaciones a realizar	24
4.3.1. Alta velocidad	24

4.3.2.	Tren regional	25
4.3.3.	Tranvía.....	25
4.3.4.	Metro	25
4.3.5.	Monorraíl	25
4.4.	Selección de modelos existentes de líneas y material rodante para cada servicio	26
4.4.1.	Tren regional	26
4.4.2.	Tren de alta velocidad.....	35
4.4.3.	Tranvía.....	40
4.4.4.	Metro	42
4.5.	Modelado de las tecnologías en OpenPowerNet	45
4.5.1.	Tracción eléctrica	45
4.5.2.	Tracción por baterías/pilas de hidrógeno	45
4.5.3.	Tracción por diésel/GLP	47
4.6.	Resultados de las simulaciones en OpenPowerNet.....	47
4.6.1.	Tren regional	47
4.6.2.	Tren de alta velocidad.....	55
4.6.3.	Tranvía.....	58
4.6.4.	Metro	64
4.7.	Análisis de los resultados.....	70
4.7.1.	Tren regional	70
4.7.2.	Tren de alta velocidad.....	74
4.7.3.	Tranvía.....	76
4.7.4.	Metro	79
4.8.	Obtención de ratios características de cada tecnología con cada servicio	82
4.9.	Comparativa técnica de los tipos de servicio para cada tecnología	83
4.9.1.	Tracción eléctrica	83
4.9.2.	Tracción por combustible diésel y GLP	84
4.9.3.	Tracción por baterías	84
4.9.4.	Tracción por pilas de hidrógeno	84
4.10.	Conclusiones del estudio energético	85
5.	ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS PARA LA TRACCIÓN FERROVIARIA	87
5.1.	Estimación de las emisiones de cada tecnología con cada tipo de servicio.....	87
5.2.	Obtención de las ratios de emisiones de cada tecnología con cada tipo de servicio	88

5.3. Comparativa del impacto ambiental entre las diferentes tecnologías y servicios	88
5.4. Conclusiones del estudio medioambiental de las tecnologías	89
6. ESTUDIO ECONÓMICO DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS PARA LA TRACCIÓN FERROVIARIA	91
6.1. Aproximación de costes de los elementos implicados (Baterías, cables, combustibles...)	91
6.2. Obtención de ratios de coste de cada tecnología con cada tipo de servicio.....	92
6.3. Comparativa económica de las diferentes tecnologías con cada tipo de servicio	95
6.4. Conclusiones del estudio económico	95
CONCLUSIONES	98
ANÁLISIS ECONÓMICO	99
BIBLIOGRAFÍA	101

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

El presente trabajo surge de una necesidad. La necesidad de innovación. El éxito en toda empresa o ingeniería reconocida internacionalmente recae, en parte, en su capacidad de innovación y adaptación al mundo actual en el que vivimos, que constantemente va evolucionando. El sector ferroviario, por su parte, no se queda atrás. Es esa necesidad de este sector la que da origen al pensamiento de la utilización de sistemas alternativos para la tracción ferroviaria, y a su vez, da origen a este estudio.

1.2. Motivación

La motivación por este estudio se encuentra en dos partes:

La empresa, la cual me ha ofrecido incluso horas destinadas a la innovación, ya que los conocimientos obtenidos mediante el trabajo le serán de gran ayuda en un futuro que se prevé no muy lejano.

Por mi parte, ya que este estudio servirá para el desarrollo personal como estudiante a la par que laboral como profesional, ofreciéndome un valor añadido que indiscutiblemente me será de gran ayuda a lo largo de mi vida.

2. Introducción

2.1. Objetivos del trabajo

Los objetivos del trabajo son claros: Obtener ratios, tanto de coste como ambientales o de posibilidad de utilización de diversas tecnologías aptas para la tracción ferroviaria en los diferentes tipos de transporte ferroviario, póngase de ejemplo el tren y el metro, para así, de un pequeño vistazo, poder tener una idea general de cómo afrontar cualquier nuevo proyecto que debamos afrontar.

2.2. Abasto del trabajo

El trabajo se centra, especialmente, en los sistemas de tracción ferroviaria y los tipos de tracción que tenemos, todo ello simulado con un software muy complejo, así que, por lo general, no veremos un contenido tanto de recerca de información, sino más de desarrollo, prueba y error e investigación, es decir, más “de ingeniero”.

3. Descripción del software usado en la simulación

Debido a la creciente necesidad de mejorar la capacidad de los medios de transporte y minimizar los costes asociados a los procesos constructivos y de operación es esencial la optimización del sistema de electrificación de las líneas ferroviarias.

OpenTrack y OpenPowerNet son unas herramientas de simulación del sistema de electrificación ferroviaria desarrolladas por 'Institut für Bahntechnik GmbH' para la optimización del diseño del sistema ferroviario en su conjunto y del sistema de tracción eléctrica en concreto, de aplicación para todo tipo de sistemas ferroviarios: tranvías, metros, tren convencional y trenes de alta velocidad.

El software permite elegir adecuadamente el esquema del suministro de energía eléctrica de tracción para cada uno de los sistemas ferroviarios arriba mencionados. La principal razón para el uso de una herramienta software como estos programas es la complejidad para resolver el flujo de cargas de potencia de un sistema eléctrico ferroviario debido a la existencia de elementos no lineales. Además, estos programas ofrecen un muy amplio abanico de posibilidades en cuanto a las simulaciones, como por ejemplo modelar trenes con baterías, ramales muy complejos, simulaciones de más de 4 horas, las cuales ofrecen la versatilidad suficiente para poder adaptarse a cualquier petición de cualquier cliente y satisfacer todas las necesidades en lo referente a la simulación de tracción.

SENER, considerada como una de las empresas europeas líderes en el sector empresarial multidisciplinar de ingeniería, tiene gran experiencia en el transporte ferroviario. Las referencias de SENER en este campo demuestran la capacidad de realizar proyectos desde una primera fase de diseño hasta el diseño de detalle y construcción/ejecución.

El software para simulación del sistema de tracción ferroviaria OpenTrack y OpenPowerNet se ha aplicado con éxito en el diseño y dimensionamiento de la red de tracción eléctrica para muchos tipos de líneas de ferrocarril y en diferentes topologías. Sus beneficios y facilidad de uso hacen de OpenTrack y OpenPowerNet juntos una herramienta ideal para el análisis, optimización y cálculo de sistemas eléctricos de tracción ferroviaria. Por otro lado, ofrece al diseñador la capacidad de elegir configuraciones alternativas que se adapten mejor a las restricciones consideradas. La reputación, así como la experiencia del 'Institut für Bahntechnik GmbH' de Dresden, Alemania, además de las pruebas y simulaciones realizadas con el software, aseguran que la solución final ofrecida por OpenTrack y OpenPowerNet contempla todas las posibilidades presentes en el mercado, sin estar condicionada por ninguna solución en concreto, y ofrece un resultado de mucha precisión y fiabilidad.

OpenTrack y OpenPowerNet son capaces de simular cualquier red de tracción eléctrica ya que se apoya en un módulo de cálculo para sistemas eléctricos de corriente continua y alterna. Con ello OpenTrack

y OpenPowerNet pueden simular cualquier sistema de tracción eléctrica de tranvías, metros, ferrocarriles metropolitanos, ferrocarriles convencionales y trenes de alta velocidad dentro del rango de los valores típicos de tensión: desde 750 Vcc, 1.500 Vcc o 3.000 Vcc en corriente continua, hasta 1x25kVca 2x25kVca para trenes de alta velocidad con suministro en corriente alterna, incluso trenes con pilas de hidrógeno o baterías.

En el abanico de posibles aplicaciones de OpenTrack y OpenPowerNet se incluyen, sin estar limitada, los estudios de energía para el diseño básico de sistemas de redes eléctricas ferroviarias, proyectos de licitación para concursos públicos y privados y proyectos de detalle para la electrificación de nuevas líneas o de líneas ya existentes, así como para la renovación de líneas electrificadas existentes.

3.1. OpenTrack

3.1.1. Descripción general

OpenTrack es el programa básico para las simulaciones de tracción. En él, se modela la infraestructura, las estaciones, el material rodante y los servicios para la simulación, sin incluir ningún parámetro eléctrico. Es por ello que requerimos de OpenpowerNet para la simulación completa.

El Software OpenTrack, a pesar de no introducirle ningún parámetro eléctrico, puede ofrecer resultados de demanda energética, en kWh, gracias a los datos de la infraestructura, con sus pendientes y curvas, y el material rodante.

Además, permite una infinidad de posibilidades creando semáforos, cruces, ramales, vías dobles o simples, apartaderos, electrificaciones y tracción híbrida, etc

Su proceso de simulación es simple: Por cada segundo de simulación, calcula posiciones, velocidades y requerimiento de consumo de los trenes que se encuentren actualmente en la malla.

3.1.2. Datos de entrada y modelado

3.1.2.1. Datos de entrada

Como datos de entrada, separando por infraestructura, material rodante y servicios, el programa requiere:

Infraestructura:

- Estaciones de parada y su posición

- Longitud de la línea
- Limitaciones de velocidad
- Perfil longitudinal de la línea (Rampas y llanos)
- Perfil transversal de la línea (Peraltes)
- Planta de la línea (Curvas y tramos rectos)

Material rodante:

- Datos generales: Longitud del tren, vagones, masa, aceleraciones, velocidad máxima, etc
- Datos mecánicos: Coeficientes de la fórmula de Davis (resistencia al avance), curvas de velocidad-esfuerzo, adherencia, etc

Servicios:

- Estaciones de parada
- Tiempo de parada
- Hora y estación de salida

3.1.2.2. Configuración final

Una vez se han introducido todos los datos pertinentes, obtenemos la siguiente configuración:

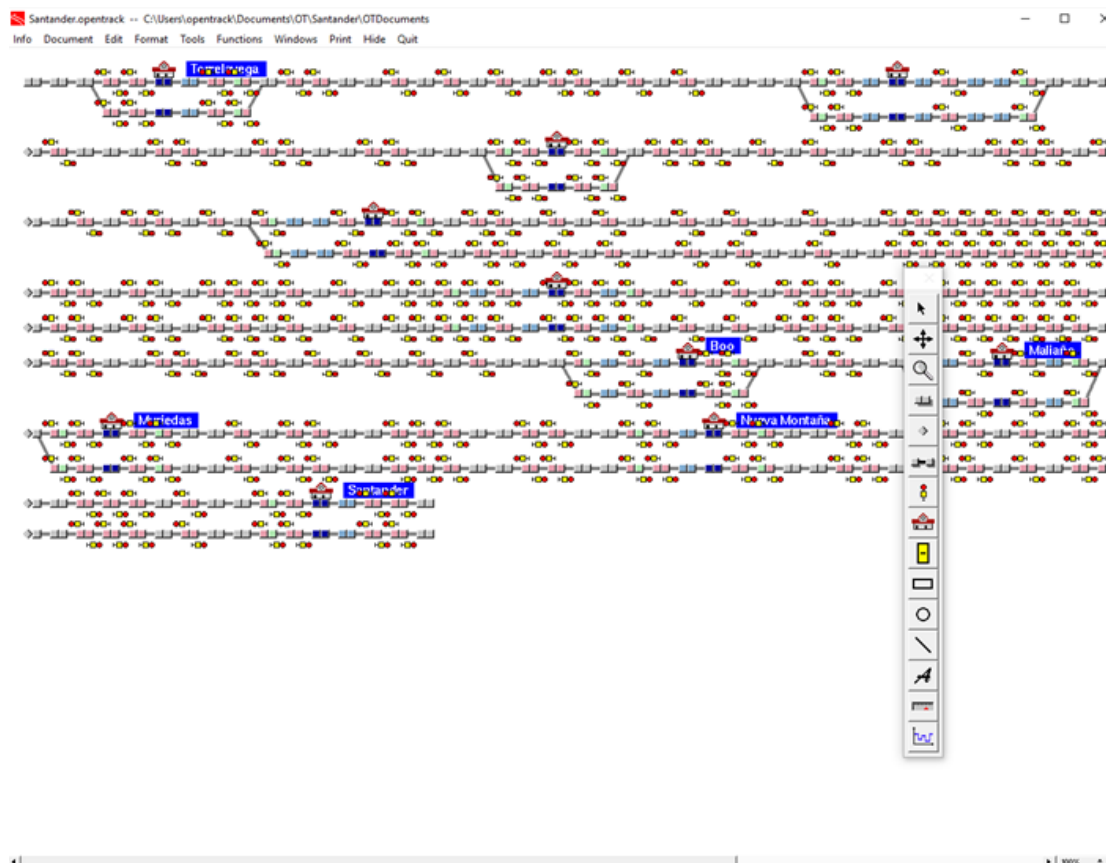


Figura 1. Imprimir pantalla del esquema final del programa OpenTrack

En ella, podemos observar la infraestructura, con sus estaciones, apartaderos, señales y demás. Aunque se vea en línea recta, cada uno de los nodos contiene información de su punto kilométrico y cada eje tiene información de su pendiente. Las curvas y peraltes, por su parte, nos afectan a las velocidades máximas, por peligro de descarrilamiento.

Los demás datos introducidos se encuentran navegando por la ventana de 'Tools', donde se encuentran las estaciones, trenes, servicios y demás.

A partir de este punto ya podemos lanzar simulaciones, marcando la hora de inicio y fin.

3.1.3. Resultados

Una vez termina la simulación, el programa OpenTrack ofrece una serie de resultados que permiten comprobar i verificar todos los datos de entrada i el comportamiento de la infraestructura sin considerar electrificación.

De los resultados obtenidos, destacamos:

3.1.3.1. Simulación de marcha

Estos resultados se obtienen mediante la creación de una gráfica y asignación de la unidad de medida de cada eje, aparte de seleccionar el servicio del cual se quiera el resultado. En la figura vemos un resultado del perfil de velocidades, es decir, la velocidad frente al punto kilométrico, según cada servicio. Además, el programa nos ofrece muchas más opciones de resultado, como el esfuerzo, la aceleración, la duración, el gradiente, la potencia o la adherencia.

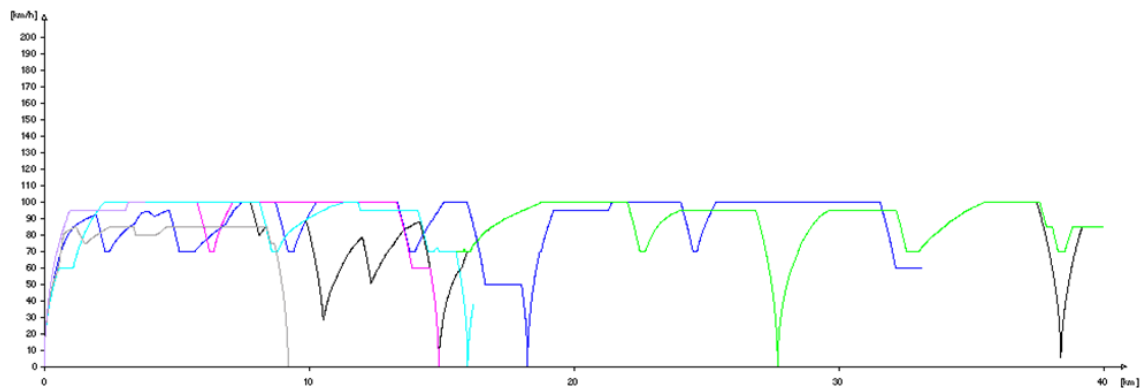


Figura 2. Gráfico de velocidad vs pK de la simulación de OpenTrack

3.1.3.2. Simulación de flota

Quando queremos analizar en funcionamiento de la flota introducida, nos interesa principalmente la hora de llegada a cada parada y el tiempo de parada en cada una de ellas, así como si opera con retraso o en hora.

Así pues, el resultado más óptimo para la flota es la malla de tráfico, la cual representa en un eje el tiempo transcurrido y en el otro el punto kilométrico de la vía.

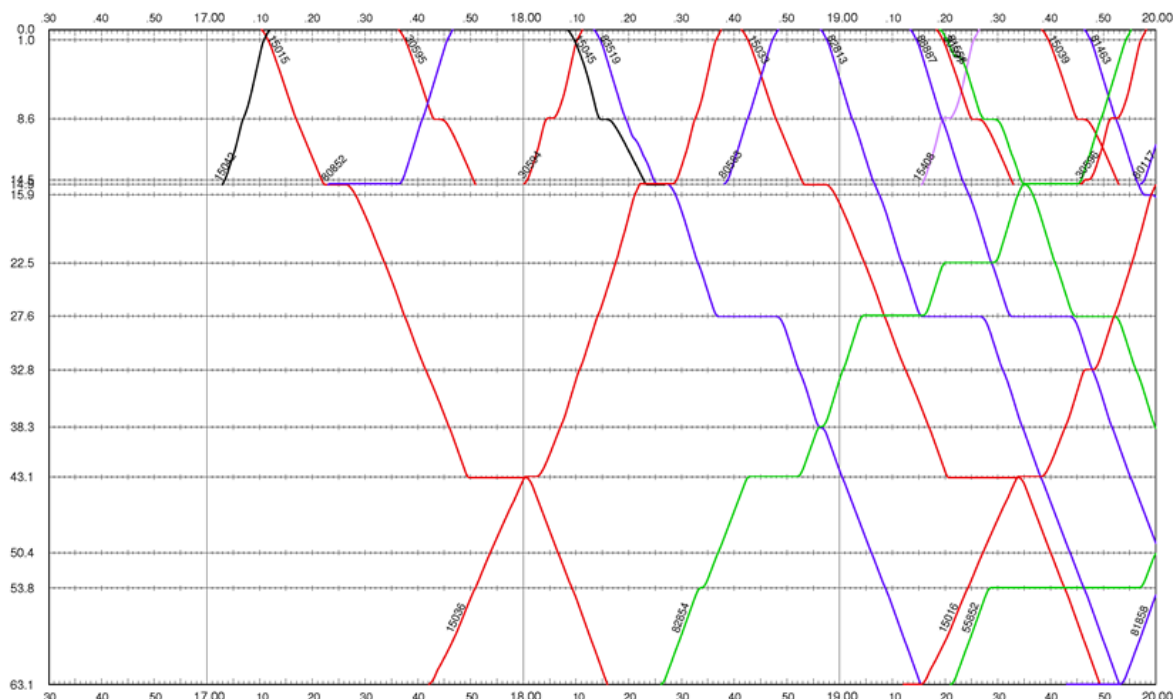


Figura 3. Malla de circulaciones de la simulación de OpenTrack

3.2. OpenPowerNet

3.2.1. Descripción general

OpenPowerNet es el programa en el cual se modela toda la parte eléctrica. Es por ello que tiene más complejidad que OpenTrack y, por tanto, más horas de trabajo.

Hay dos formas de introducir toda la información de entrada: En formato XML, abriendo y cerrando pestañas e insertando valores en ellas, o en formato texto, introduciendo comandos junto a los valores y montando la disposición de pestañas usando tabuladores.

A diferencia de OpenTrack, OpenPowerNet no puede simular por sí solo, ya que la información básica de circulaciones, tiempos, perfil, etc los contiene Opentrack. Por tanto, para correr la simulación eléctrica en OpenPowerNet se deben interconectar los dos programas y lanzar la simulación, que se verá en los dos softwares simultáneamente. No obstante, a la hora de analizar sí que lo puede hacer por separado.

Al ser más complejo, estas simulaciones suelen durar más, aproximadamente suelen durar 5-10 minutos por hora simulada, pero ha llegado a tardar hasta 1 hora por hora de simulación, en una simulación de 2x25 kV AC.

El proceso de simulación se basa en, por cada segundo de simulación, iterar hasta convergir en la solución posible más óptima, dentro de los límites establecidos. Una vez ha convergido, guarda los datos de tensión, corriente, potencia y demás y pasa al siguiente segundo. Es por eso que los resultados obtenidos al final son por cada segundo.

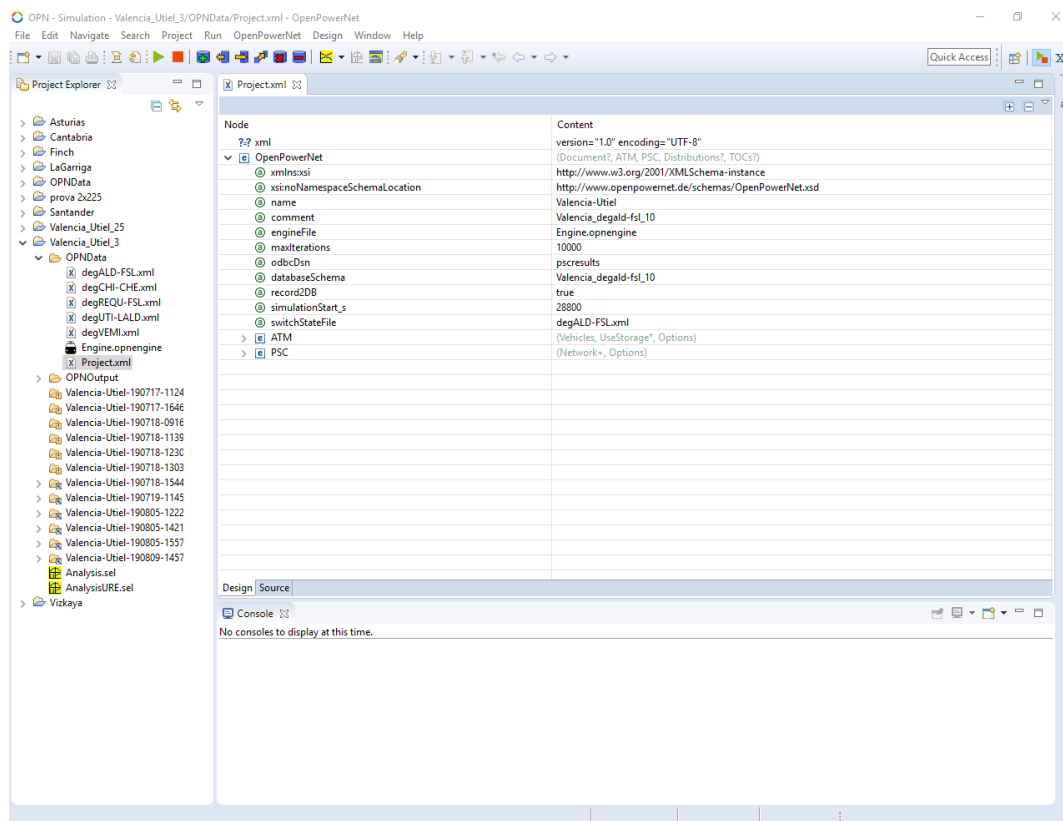


Figura 4. Pantalla de trabajo de OpenPowerNet en formato XML

Como resultados, según los datos de entrada, se podrán obtener unos resultados u otro, pero los esenciales son corrientes en catenaria, tensiones en catenaria y carril-tierra, tensiones en pantógrafo y potencias en las subestaciones, entre otros.

3.2.2. Datos de entrada y modelado

3.2.2.1. Datos de entrada

Para separar en bloques los datos de entrada de OpenPowerNet, al ser muchos, los separaremos entre Infraestructura, subestaciones y material rodante:

Infraestructura:

- Conductores y conectores: Sustentador, contacto, carriles, negativo (alterna), conectores entre conductores, picas, etc (Longitud, posición, radio equivalente, resistividad, coeficiente de temperatura, ...)
- Interruptores y aisladores

Subestaciones:

- Elementos principales: Rectificadores y transformadores (Potencia, tensiones (Vacío y cc), pérdidas, corrientes máximas (cc),...)
- Barras de unión de los feeders positivos, negativos y de retorno
- Feeders positivos, negativos y de retorno

Material rodante:

- Potencia de tracción y auxiliar
- Rendimiento
- Tensión máxima y tensión de trabajo
- Curva de limitación de corriente
- Curva de esfuerzo de frenado regenerativo (en caso que haya regeneración)

Debemos distinguir entre las simulaciones de corriente continua y corriente alterna, ya que la alterna complica más la introducción de datos; Al haber corrientes inducidas entre conductores, hay que definir posición cartesiana (x,y) a cada uno de los conductores, a parte de su radio equivalente, y requerimos de un feeder negativo auxiliar y otro de retorno para las simulaciones de 1x25 y 2x25, por ejemplo.

3.2.2.2. Configuración final

Una vez están todos los datos introducidos, OpenPowerNet nos ofrece una muy buena herramienta para visualizar todos los elementos introducidos mediante texto o XML, de manera que podemos comprobar si concuerda todo con lo esperado, llamado formato 'NMMV'.

A continuación, mostramos un ejemplo en formato NMMV de una simulación de 3.000 V DC y otra de 2x25.000 V AC:

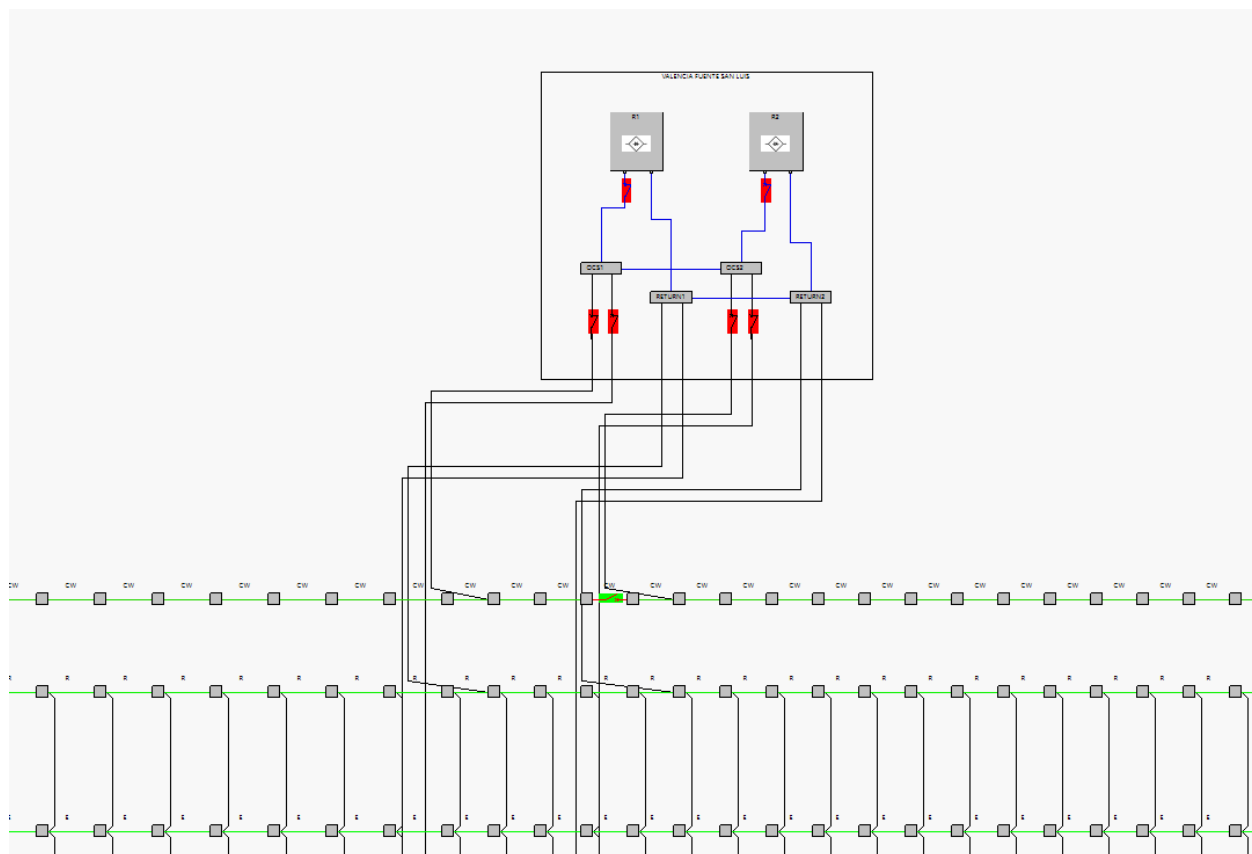


Figura 5. Esquema eléctrico de OpenPowerNet en 'NMMV' de 3.000 V DC

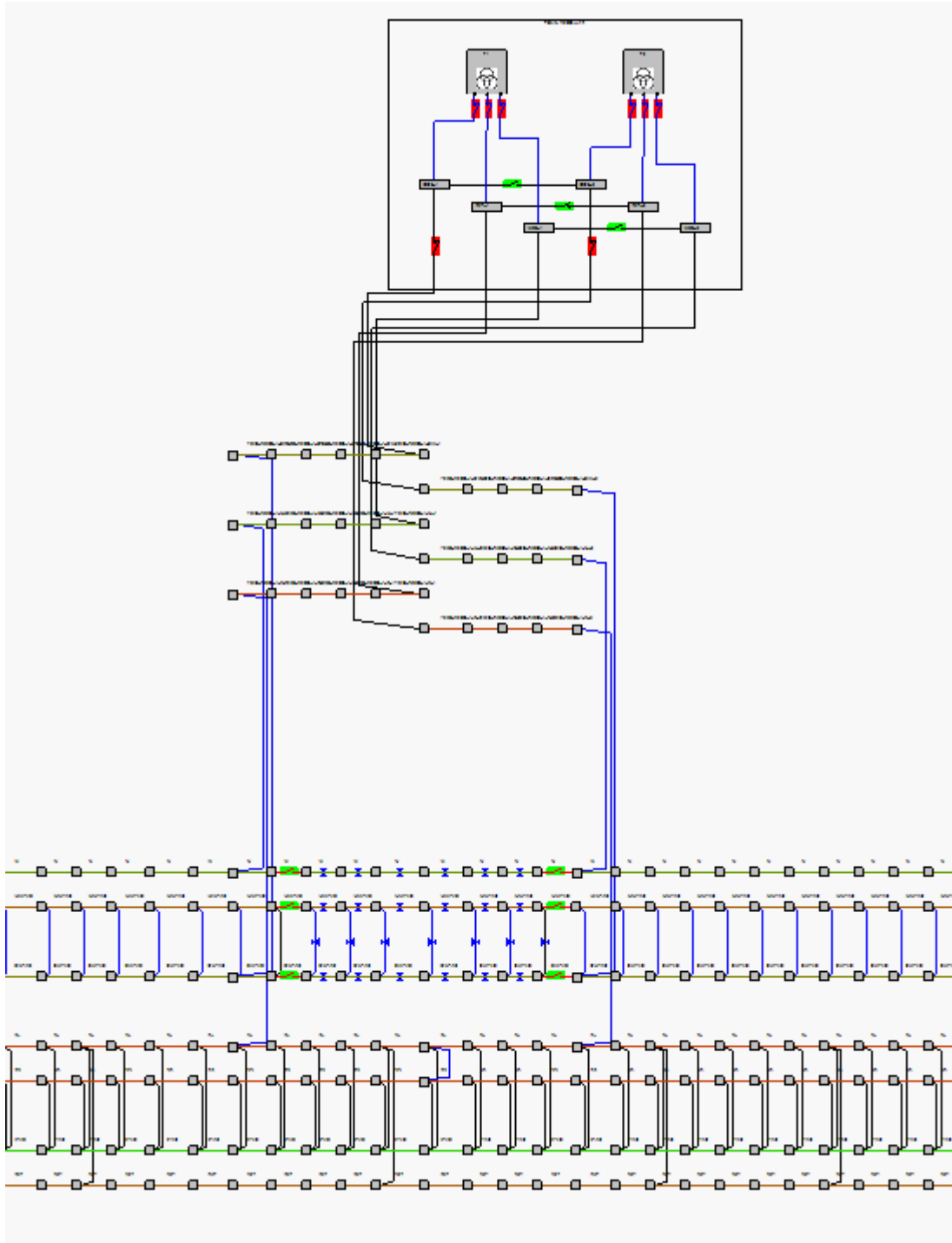


Figura 6. Esquema eléctrico de OpenPowerNet en formato 'NMMV' de una simulación de 25.000 V AC

Analizando las dos figuras anteriores, vemos que el modelo en 3.000 V DC contiene únicamente 3 conductores: CW (paralelo entre sustentador y contacto), R (paralelo entre los dos carriles) y E (tierra). Con éstos ya es suficiente para la simulación en DC. A parte, en la subestación (cuadrado superior), vemos dos rectificadores, que en realidad contienen la información del transformador y el rectificador.

En cambio, en AC aparecen elementos nuevos, como el carril derecho e izquierdo (RR y RL), el sustentador y contacto por separado, el cable de retorno y el feeder negativo (ya que es una simulación de 2x25.000 V). A parte, cada uno de ellos contiene la coordenada x e y en el plano perpendicular a la dirección del tren, y los radios equivalentes. En la subestación, entonces, tenemos los transformadores de tres arrollamientos, indispensables para alimentar el feeder negativo y la catenaria.

Otra diferencia destacable que podemos observar es la aparición de la zona neutra en la simulación de 2x25.000 V, la cual separa las dos fases de las dos subestaciones i evita que se cortocircuiten entre ellas.

3.2.3. Resultados

En la pestaña de análisis que contiene OpenPowerNet podemos escoger entre multitud de resultados que deseemos conocer. Estos resultados los podemos obtener tanto en Excel como en PDF, y a parte de los datos nos retorna una gráfica por cada conjunto de datos.

Normalmente, los datos que más nos interesan son los de corrientes máximas, tensiones mínimas en catenaria y máximas en carril-tierra y potencias máximas, todas ellas en valor instantáneo y rms 300 segundos o rms 600 segundos, pero también da la opción de obtener energía, velocidad, aceleración, esfuerzo, tiempo en servicio e incluso seleccionar un punto de la línea y ver la evolución de la tensión en ese punto, por ejemplo

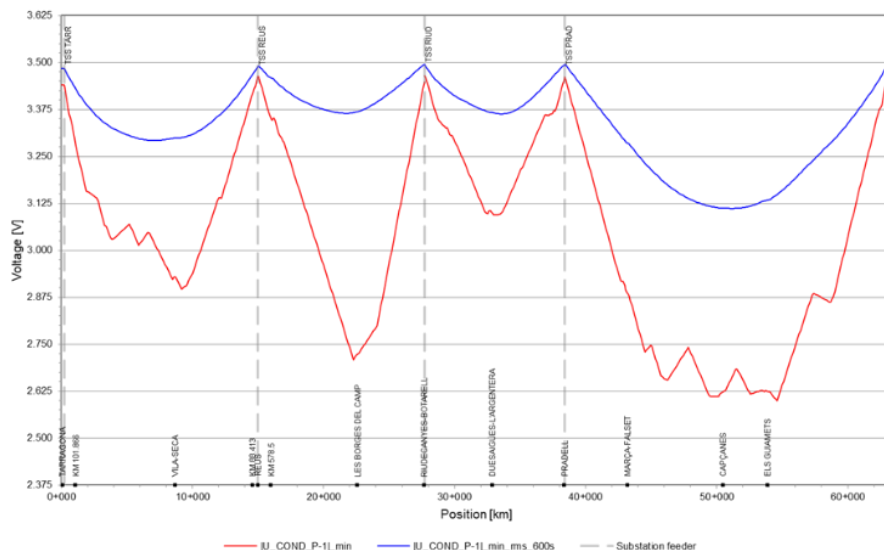


Figura 7. Tensiones mínimas en catenaria instantánea (rojo) y rms 10' (azul)

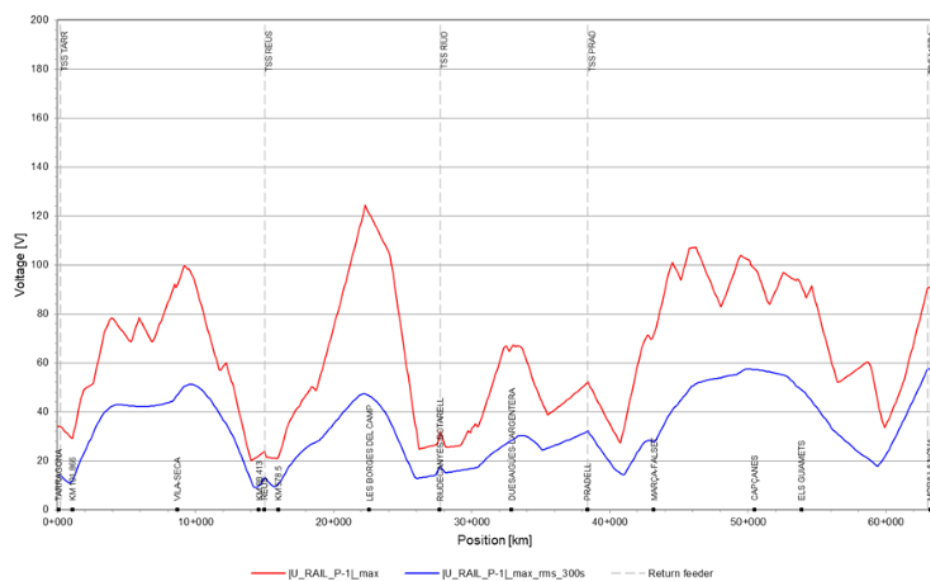


Figura 8. Tensiones máximas carril-tierra instantánea (rojo) y rms 5' (azul)

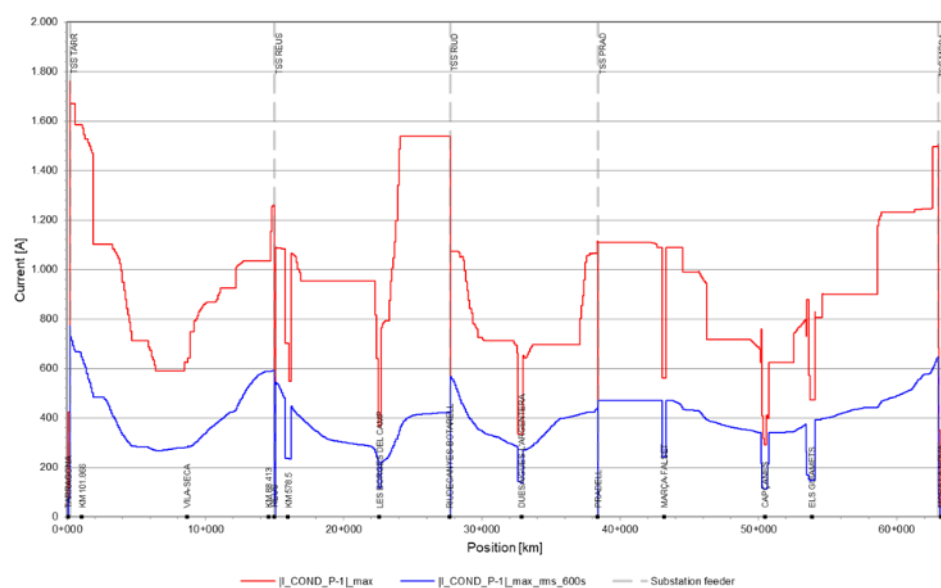


Figura 9. Corriente máxima en catenaria instantánea (roja) y rms 10' (azul)

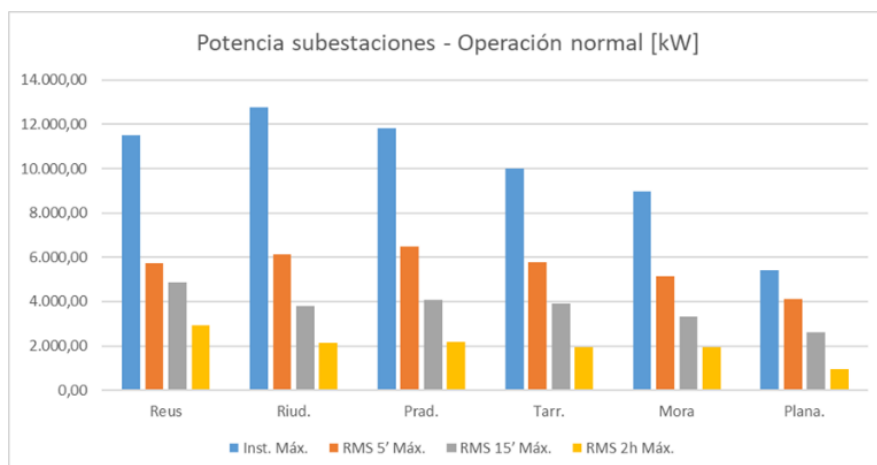


Figura 10. Potencias máximas por subestación de tracción (valores instantáneos, rms 5', rms 15' y rms 2h)

4. Estudio energético de las diferentes tecnologías para la tracción ferroviaria

En este capítulo encontraremos todo lo referente al estudio energético, relacionando tecnologías de tracción con los tipos de servicio ferroviario.

En primer lugar, se identifican esas tecnologías y servicios, los cuales serán clave para el resto del proyecto. Después, se deberá discutir sobre la estrategia que se utilizará a la hora de modelarlas en los softwares de simulación, así como buscar simulaciones reales que hayamos simulado y puedan adaptarse a lo que se busca, para así hacer un proyecto más real. Una vez esté todo modelado se deberá simular y estudiar los resultados, para así ver si se necesita otra iteración o se puede continuar. Por último, usando los resultados, se obtendrán las ratios pertinentes y se concluirá entorno a éstas.

4.1. Identificación de las tecnologías y tipos de servicio

4.1.1. Identificación de las tecnologías

Se entiende por tecnologías para la tracción ferroviaria cualquier tipo de suministro energético que sea viable para ser transformado en energía mecánica y eléctrica, para así alimentar tanto el movimiento del tren como su iluminación y climatización.

A la hora de identificar cuáles deberían ser objeto de estudio y cuáles no, se debe conocer cuales se usan actualmente o de cuales se empieza a requerir información o proyectos, aunque sean solamente teóricos.

En total, que puedan llegar a ser viables, se contemplan 5 tecnologías, descritas a continuación:

- **Tracción eléctrica**

Tecnología para la tracción ferroviaria más extendida y conocida. Consta de unas subestaciones de tracción, las cuales proporcionan energía eléctrica a la catenaria, que vienen a ser los conductores que se encuentran encima de las vías del tren. Además, el material rodante tiene un pantógrafo, que es el elemento en contacto con la catenaria y por el cual circula la corriente que llega hasta los servicios auxiliares (luces y clima) y hasta los motores eléctricos para la tracción.

- **Tracción con combustible diésel**

También muy conocida, ya que después del vapor, fueron las primeras en desarrollarse. En este tipo de composición no existe catenaria, únicamente vías. Los trenes tienen un depósito de gasóleo y los motores son térmicos y queman ese gasóleo. Además, para los servicios auxiliares que funcionan con energía eléctrica, tienen unos alternadores que generan esa electricidad con el movimiento de los motores.

- **Tracción con combustible GLP (Gases licuados del petróleo)**

Muy parecida a la anterior, en esta tecnología el motor térmico quema GLP en vez de diésel, siendo prácticamente idéntica por lo demás.

- **Tracción con baterías**

Este sistema no es muy usado, pero sí muy demandado para futuros proyectos y muy importante para la incorporación de las energías renovables para la tracción ferroviaria.

En esta tecnología tampoco se encuentra la catenaria, simplemente las vías y el material rodante. Los trenes, en este caso, usan un motor eléctrico, el cual obtiene la energía eléctrica de las baterías que lleva incorporadas, de la misma manera que los servicios auxiliares.

Algo muy importante también cuando hablamos de baterías es cómo y cuándo las cargamos. Por ejemplo, se pueden cargar al inicio y final de un recorrido y que lleguen casi vacías o bien cargarlas un poco en cada estación en la que para el tren. Por otro lado, la energía que carga las baterías puede venir de placas fotovoltaicas, generadores de combustible fósil, la red eléctrica, etc.

- **Tracción con pilas de hidrógeno**

Actualmente no se usa este tipo de tracción, pero es una opción que, en un futuro no muy lejano, podría llegar a ser viable.

Una pila de hidrógeno es un dispositivo que convierte la energía química en eléctrica, térmica y vapor de agua. Para ello, usa el Hidrógeno, que al combinarse con oxígeno genera un flujo eléctrico, aparte de generar agua (H₂O) y calor, lo cual convierte el agua en vapor de agua.

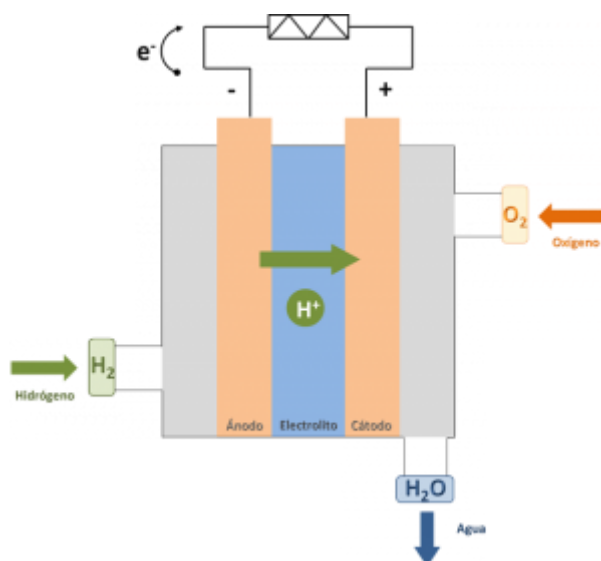


Figura 11. Esquema del funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno [2]

Así pues, la electricidad que se usa para el motor eléctrico y servicios auxiliares viene de estas pilas de hidrógeno y por lo tanto no se requiere tampoco de catenaria. Por otro lado, de la misma manera que las baterías tienen que ser cargadas con energía eléctrica, estas pilas deben ser cargadas con hidrógeno líquido, que es su combustible y que, por desgracia, no es fácil de conseguir.

4.1.2. Identificación de los tipos de servicio

En cuanto a los tipos de servicio para la tracción ferroviaria, el proyecto se centrará también en lo que existe en la actualidad y lo que se suele ver, pero no tanto en futuras ideas ya que admiten muy poco juego.

Los tipos de servicio para la tracción ferroviaria que se tendrán en cuenta son:

- **Trenes convencionales**

Son los más comunes, los trenes convencionales o regionales, para el transporte de pasajeros y/o mercancías. Suelen funcionar con corriente continua (si hablamos de la tracción eléctrica) y en un rango de tensiones de 750 V, 1500 V o 3000 V. Son los más versátiles, ya que se pueden usar para distancias cortas, medias y largas. Rondan unas velocidades máximas de 200 km/h.

- **Trenes de alta velocidad**

Estos tipos de sistemas también son usados para el transporte de personas y/o mercancías. Como requieren mucha más energía, en las composiciones eléctricas se suele usar alimentación en corriente alterna, de 25.000 V, ya sea simple o doble. Suelen ser usados para distancias largas y sus velocidades máximas rondan los 300 km/h.

- Tranvía

Los tranvías son pequeños trenes que suelen ser encontrados dentro de la ciudad y en el exterior. Se usan solamente para transportar personas y al ser más pequeños y requerir menos energía, se suelen ver con tensiones en corriente continua de 500 V, 750 V y 1500 V, como mucho. Se usan para recorridos cortos dentro de ciudad y sus velocidades máximas rondan los 80 km/h.

- Metro

Uno de los más conocidos para el transporte urbano, son pequeños trenes que circulan bajo tierra y se usan para transportar pasajeros. En este caso, con tracción eléctrica la catenaria tiene dos posibilidades: o estar en el techo en forma de catenaria rígida o bien aparecer en el suelo como un “tercer carril”. Los rangos de tensiones y velocidades son los mismos que el tranvía y se usa para recorridos cortos o medios en algunos casos.

- Monorraíl

Los monorraíles son unos sistemas muy poco vistos en España, pero en otros países aparecen mucho más. Son una especie de tranvía que están elevados en una plataforma donde se encuentra el raíl que guía a los trenes. En este caso no aparece catenaria, sino que en la misma plataforma hay un “segundo raíl” que aporta la energía al material rodante. Usados también para el transporte de personas y con los mismos rangos de tensión, distancia y velocidad que el tranvía o el metro.



Figura 12. Imagen de un monorraíl del Cairo [3]

4.2. Criterios de diseño y modelado para cada tecnología

4.2.1. Tracción eléctrica

- Si es corriente continua, se moldeará el paralelo del cable de contacto y sustentador, el paralelo de los carriles y las subestaciones de tracción con dos grupos rectificadores a la tensión que corresponda. Por otro lado, si es corriente alterna, se modelarán subestaciones con transformadores de tres arrollamientos con tensión de salida de 25.000 V AC, los cables sustentadores y de contacto por separado, los dos carriles por separado (o cuatro, según si es vía doble o simple), y cables de retorno y auxiliares según el caso.

Además, en este tipo de tracción se deberá indicar la posición de cada elemento en un plano perpendicular a la dirección del tren, ya que se tienen en cuenta las influencias electromagnéticas de unos cables a otros.

- Se implementarán motores de continua tanto en simulaciones de continua como de alterna, ya que en alta velocidad los propios trenes incorporan rectificador i motor DC.
- La energía eléctrica se supondrá que viene del mix eléctrico español, para el tema de costes y emisiones.

4.2.2. Tracción con combustible diésel o GLP

- El modelado será igual que la tracción eléctrica en continua, con catenaria, carriles, etc ya que el programa no permite usar motores diésel.
- Por tanto, los motores en el modelado deberán ser eléctricos DC. No obstante, en vez de usar un rendimiento del 90 % al 98% (el típico de motores eléctricos), se usará un rendimiento típico de motor de combustión interna (del 35 % al 40 %).
- La energía que impulsa al tren se supondrá que viene al 100% del combustible fósil.
- Cuando se obtengan los resultados de consumo, esa energía, que será eléctrica, se podrá considerar como energía que se requiere del combustible que se use, restando las pérdidas por efecto Joule.

4.2.3. Tracción con baterías

- Para la tracción con baterías, el modelado será igual al de continua de tracción eléctrica, pero incorporando baterías en los trenes con una capacidad aproximada que se irá ajustando.
- Las baterías serán las comunes en la tracción ferroviaria: ION-Litio. Éstas se pueden cargar tanto por catenaria como en cada estación y no modelar catenaria, más adelante se discutirá como se realiza esta simulación. Además, se aprovechará la energía del frenado para cargarlas también.
- Los motores serán de continua, igual que en la tracción eléctrica.

- Como el programa ya incorpora la opción de baterías incluso de donde y cuando cargarlas, no se deberán hacer muchas estimaciones.

4.2.4. Tracción con pilas de hidrógeno

- Exactamente igual que la tracción anterior, pero sin catenaria, es decir, las baterías solo se podrán cargar en las estaciones cuando pare. Esto es debido a que las pilas de hidrógeno funcionan con hidrógeno líquido y el tren debe estar parado para repostar.
- Los motores serán también iguales a los anteriores, de DC.
- Se aplicarán los rendimientos a las baterías correspondientes a las pilas de hidrógeno y la energía necesaria obtenida se convertirá en energía obtenida del hidrógeno, la que se supone que será el 100%.

4.3. Discusión y optimización de las simulaciones a realizar

Si nos fijamos en los apartados anteriores, vemos que se han seleccionado un total de 5 tecnologías de tracción ferroviaria y 5 tipos de servicio. Por tanto, si se realizaran todas las simulaciones, serían 25 Simulaciones en total. Teniendo en cuenta que cada simulación puede tardar hasta 8 horas, pero tardan 2 horas de media, serían mínimo 50 horas de simulación. Si además contamos el tiempo requerido para analizar los resultados, que de media es de media hora, esto nos sumaría 12,5 horas al tiempo total “perdido” mientras simula y analiza, lo que haría que se necesiten 62,5 horas para ello.

En la situación actual de la empresa, y además si añadimos el tema del coronavirus, es completamente inviable gastar esa cantidad de tiempo como tiempo perdido en las simulaciones. Por tanto, se opta por la optimización de las simulaciones ajustándonos a la realidad y disminuir al máximo el número de simulaciones.

Esta discusión se hará por cada tipo de servicio:

4.3.1. Alta velocidad

Siendo realistas, los requerimientos tan exigentes que presentan los trenes de Alta velocidad, que pueden llegar hasta los 10 MW de demanda de potencia, eliminan por absoluto las posibilidades de realizar la simulación con baterías o pilas de hidrógeno, ya que los requerimientos técnicos no podrían ser satisfechos, a parte del altísimo coste que tendrían.

Por otro lado, el usar motores de combustión interna para la alta velocidad no únicamente supondría un paso atrás en la evolución de este sector, sino que también tendría una cantidad de emisiones y demandas de combustible que serían muy difíciles de satisfacer ambiental y económicamente.

Finalmente, de este tipo de servicio se decide realizar únicamente la simulación con catenaria y energía eléctrica.

4.3.2. Tren regional

En este caso, los requerimientos podrían ser satisfechos por todos los tipos de tecnología. Además, nos interesaría ahorrar la catenaria en zonas que por ejemplo sea muy complicada su instalación. Este tipo de servicio es el perfecto para discutir sobre los diferentes tipos de tecnología.

4.3.3. Tranvía

Los tranvías, por su pequeña demanda, son perfectos para la implementación de las baterías, ya que realizan tramos cortos y pueden combinarse con energías renovables. Además, al pasar por ciudad, la catenaria a veces molesta y prescindir de ella sería un punto muy a favor.

En cuanto a combustibles fósiles, puede ser que no sea tan conveniente por el tema de acumulación de contaminación en ciudades, pero aun así se realizarán esas simulaciones.

Por tanto, en este servicio también se discutirán las 5 tecnologías.

4.3.4. Metro

Exactamente igual que el tranvía, pero bajo tierra, se puede aplicar exactamente la misma discusión que con el tranvía.

4.3.5. Monorraíl

En cuanto al monorraíl, como ya se dijo anteriormente, se asemeja mucho a un tranvía, pero con la peculiaridad de estar elevado y tener sólo un carril. Entonces, para ahorrar simulaciones, no se ha realizado ninguna con este tipo de servicio, y se supone que las conclusiones obtenidas para el tranvía podrían ser trasladadas al monorraíl también.

OPTIMIZACIÓN

Ya se han reducido bastante las simulaciones a realizar, pero aun así hay un trabajo de optimización pendiente para las que sí se deben realizar.

Para los combustibles fósiles, que en teoría serían dos simulaciones por separado, se considera un rendimiento común para los dos, de un 35%, y los resultados obtenidos ya se separan en dos con los poderes caloríficos de cada combustible.

De forma parecida se hará con las baterías y las pilas de hidrógeno, los cuales son dos sistemas de almacenaje de energía, y asemejando rendimientos y haciendo las conversiones pertinentes, se aprovecha el resultado de las baterías y se traslada para las pilas de hidrógeno.

A continuación, se muestra una tabla resumen final de las simulaciones a realizar y del número total de simulaciones:

Tabla 1. Resumen de la optimización de las simulaciones

Sistemas/Tecnologías	Eléctrica	Baterías	Pilas Hidrógeno	GLP	Diésel	Total
Alta velocidad	SI					1
Regional	SI	SI		SI		3
Tranvía	SI	SI		SI		3
Metro	SI	SI		SI		3
Monorraíl						0
Total	4	3		3		10

Vemos que gracias a la discusión de las posibilidades reales de las simulaciones y a un simple trabajo de optimización se ha reducido el número de simulaciones a hacer de 25 a 10, en un 60 %. Ahora ya tenemos una meta posible para el abasto del proyecto.

4.4. Selección de modelos existentes de líneas y material rodante para cada servicio

4.4.1. Tren regional

Para simular el funcionamiento de los trenes regionales, se acudirá a una simulación que realizamos hace un tiempo, correspondiente a la línea de Reus-Tarragona, pasando por Riudecanyes. Esta línea es de 3000 V DC.

En la línea modelada existe un tráfico mixto, consistente en varios tipos de servicios, compuestos por los modelos de material rodante descritos a continuación.

4.4.1.1. UT 470

Tabla 2. Características del material rodante UT 470

UT 470	
Peso total del convoy en vacío (T)	205
Pasajeros máximos	234
Ocupación (%)	100
Potencia de tracción (kW)	1153
Potencia auxiliar (kW)	100
Velocidad máxima (km/h)	140
Aceleración máxima de servicio (m/s ²)	0,7
Deceleración máxima de servicio (m/s ²)	-0,66
Limitación de corriente	Según Figura 13

Tabla 3. Curva del esfuerzo de tracción del material rodante UT 470

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	85,32
20	66,60
40	47,56
60	32,24
80	17,05
100	40,23
120	33,66
140	26,36

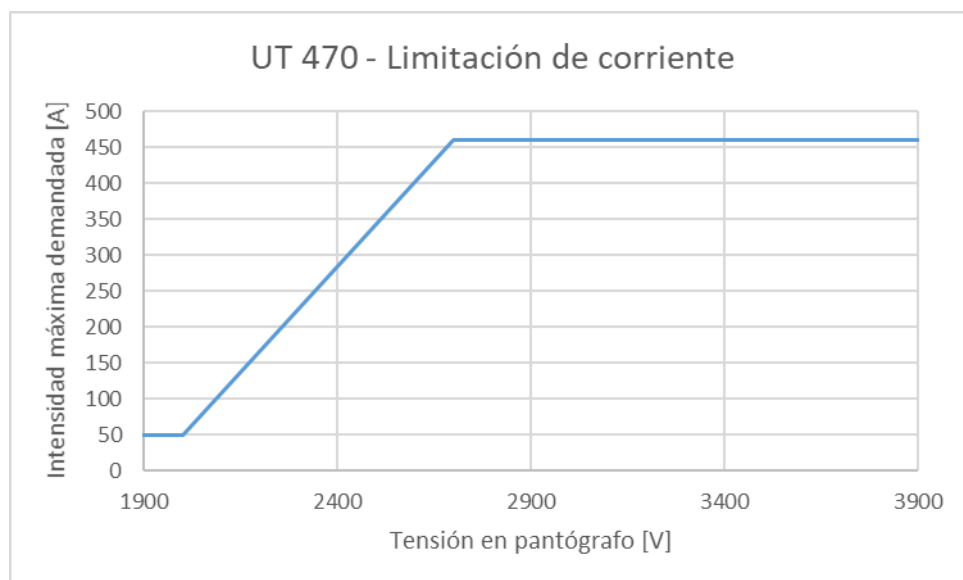


Figura 13. Limitación de corriente para el material móvil UT 470

4.4.1.2. UT 440

Tabla 4. Características del material rodante UT 440

UT 440	
Peso total del convoy en vacío (T)	204,25
Pasajeros máximos	234
Ocupación (%)	100
Potencia de tracción (kW)	1168
Potencia auxiliar (kW)	100
Velocidad máxima (km/h)	140
Aceleración máxima de servicio (m/s ²)	0,7
Deceleración máxima de servicio (m/s ²)	-0,66
Limitación de corriente	Según Figura 14

Tabla 5. Curva del esfuerzo de tracción del material rodante UT 440

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	88,15
20	69,15
40	50,26
60	35,62
70	26,5
80	49,93
100	41,41
120	35,01
140	28,79

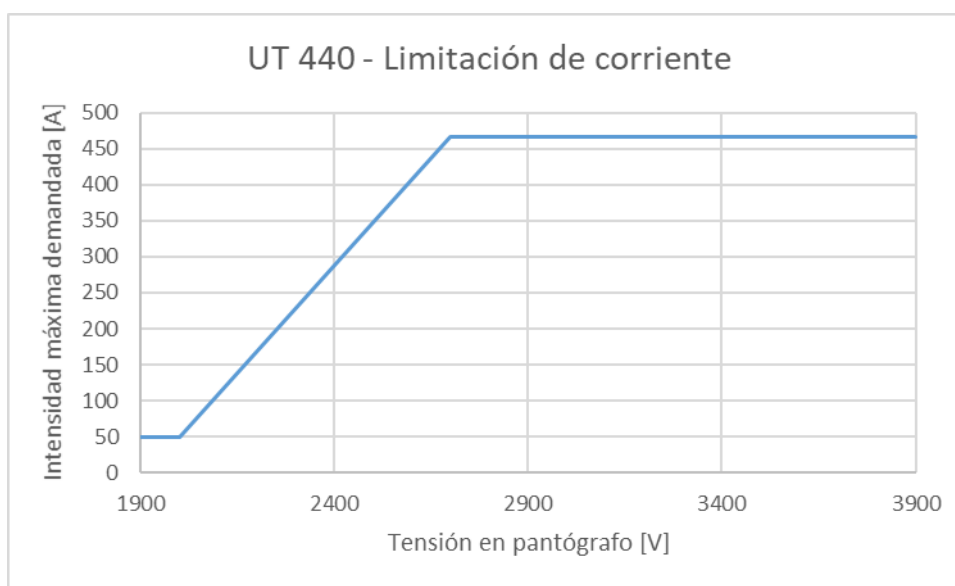


Figura 14. Limitación de corriente para el material móvil UT 440

4.4.1.3. LOC 253

Tabla 6. Características del material rodante LOC 253

LOC 253	
Peso total del convoy en vacío (T)	81
Carga (T)	719
Potencia de tracción (kW)	5167
Potencia auxiliar (kW)	25
Velocidad máxima (km/h)	100
Aceleración máxima de servicio (m/s^2)	0,6
Deceleración máxima de servicio (m/s^2)	-0,66
Limitación de corriente	Según Figura 15

Tabla 7. Curva del esfuerzo de tracción del material rodante LOC 253

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	299,90
20	299,90
40	299,90
60	299,90
80	219,57
100	168,40

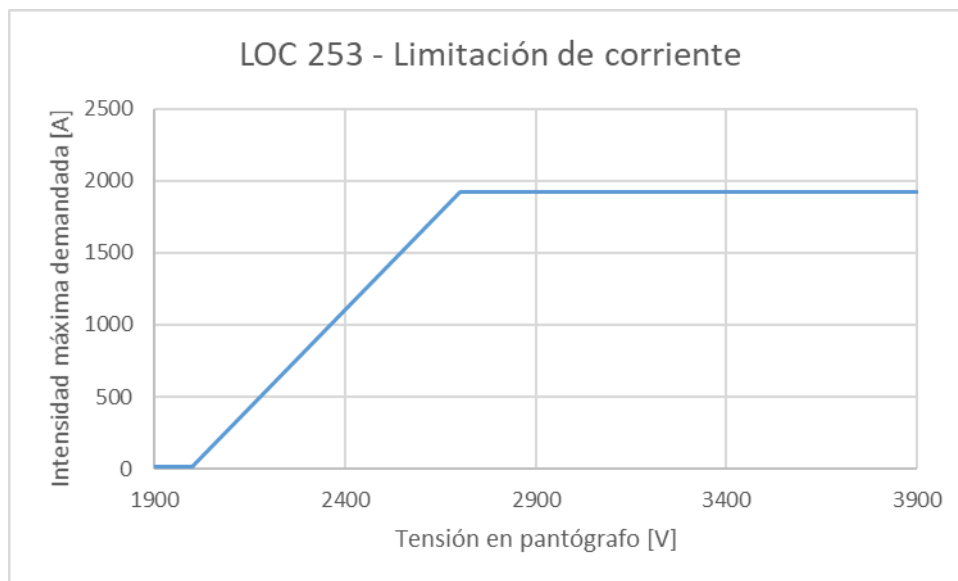


Figura 15 Limitación de corriente para el material móvil LOC 253

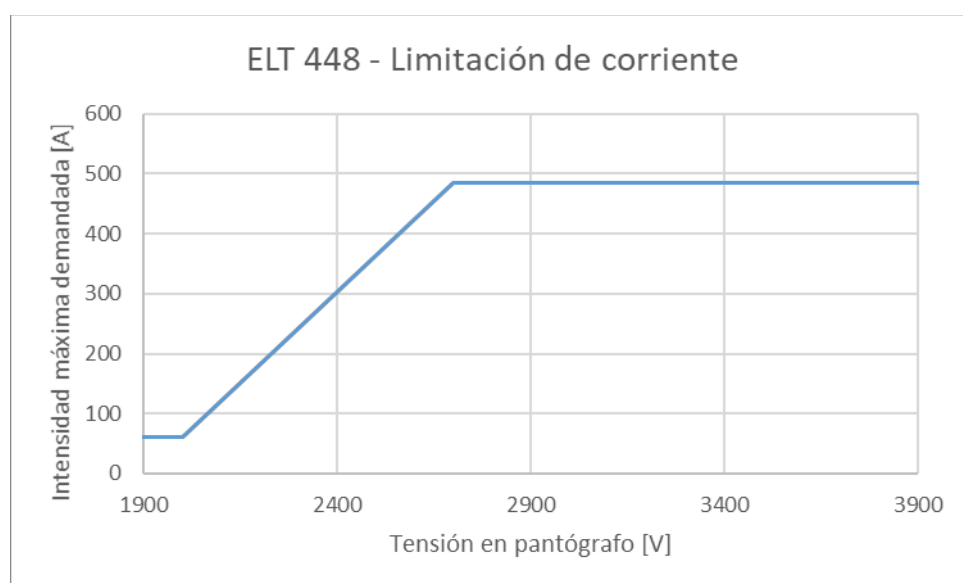
4.4.1.4. ELT 448

Tabla 8. Características del material rodante ELT 448

ELT 448	
Peso total del convoy en vacío (T)	170
Pasajeros máximos	212
Ocupación (%)	100
Potencia de tracción (kW)	1200
Potencia auxiliar (kW)	120
Velocidad máxima (km/h)	160
Aceleración máxima de servicio (m/s^2)	0,7
Deceleración máxima de servicio (m/s^2)	-0,65
Limitación de corriente	Según Figura 16

Tabla 9. Curva del esfuerzo de tracción del material rodante ELT 448

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	74,13
20	60,45
40	47,54
60	34,64
80	24,78
100	42,95
120	36,20
140	31,03
160	25

**Figura 16.** Limitación de corriente para el material móvil ELT 448

4.4.1.5. LOC 289

Tabla 10. Características del material rodante LOC 289

LOC 289	
Peso total del convoy en vacío (T)	169
Carga (T)	900
Potencia de tracción (kW)	6100
Potencia auxiliar (kW)	25
Velocidad máxima (km/h)	100
Aceleración máxima de servicio (m/s^2)	0,7
Deceleración máxima de servicio (m/s^2)	-0,42
Limitación de corriente	Según Figura 17

Tabla 11. Curva del esfuerzo de tracción del material rodante LOC 289

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	400,7
50	400,70
57,05	382,55
62,87	349,47
75,31	292,12
81,93	271,36
87,13	238,25
93,58	201,69
100	171,27

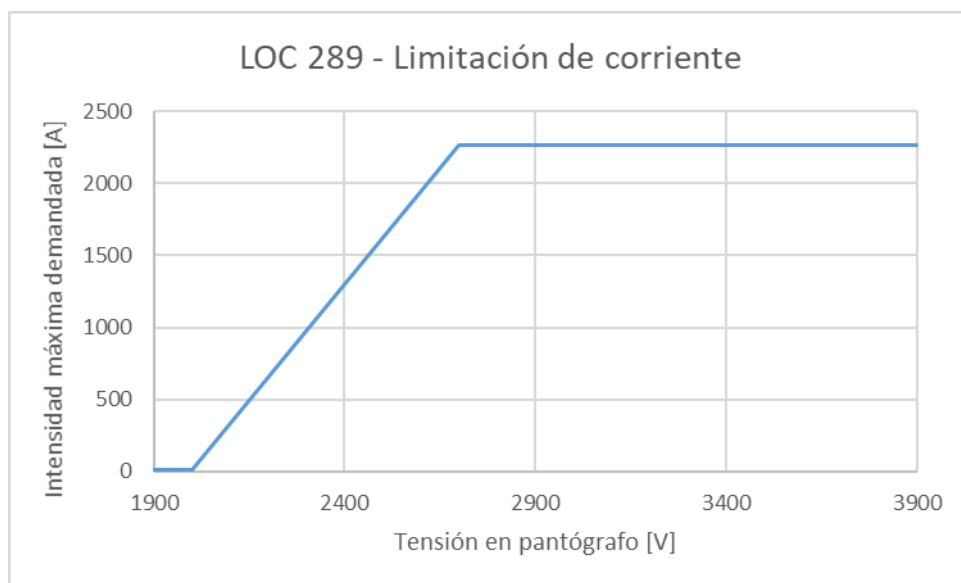


Figura 17. Limitación de corriente para el material móvil LOC 289

Para contextualizar la simulación, se adjunta una tabla con los tramos que han sido considerados en la simulación:

Tabla 12. Numeración de Pk*

Tramos		Pk [m] original	Pk [m] simulación
Tarragona-Reus (Principal)	Inicio	103+000	0+000
	Final	88+000	15+000
Reus-Mora la Nova (Principal)	Inicio	579+497	15+000
	Final	531+290	63+207
Reus-La Plana Picamoixons (Ramal)	Inicio	18+410	0+000
	Final	0+000	18+410

*pK: Punto kilométrico

Por último, otro dato importante en temas energéticos son las subestaciones de tracción implicadas, las que se ocupan de entregar la energía a toda la catenaria. A continuación, se listan las subestaciones por punto kilométrico:

Tabla 13. Subestaciones de tracción consideradas en la simulación

Subestación de tracción	Pk [m]	Tramo
Tarragona	0+200	Principal
Reus	15+000	Principal y Ramal
Riudecanyes	27+697	Principal
Pradell	38+397	Principal
Mora la Nova	63+007	Principal
Plana-Picamoixons	18+210	Ramal

4.4.2. Tren de alta velocidad

Para la alta velocidad, recurriremos a la simulación de la línea de Puertollano a Mérida, de nueva construcción de Alta velocidad, de 2x25 kV.

Para la simulación de tracción se han considerado los siguientes modelos de material rodante:

4.4.2.1. LOC 252

Para los servicios de transporte de mercancías se ha considerado el material rodante LOC 252 en composición doble y con una carga de 1500 T, cuyas características se detallan a continuación:



Figura 18. LOC 252

Tabla 14. Características del material rodante LOC 252

LOC 252	
Peso total de las dos locomotoras en vacío (T)	90x2
Carga (T)	1500
Potencia de tracción (kW)	5600x2
Potencia auxiliar (kW)	280x2
Velocidad máxima (km/h)	140
Aceleración máxima de servicio (m/s^2)	0,55
Deceleración máxima de servicio (m/s^2)	-0,55
Limitación de corriente	Según Figura 19

Tabla 15. Curva del esfuerzo de tracción del material rodante LOC 252

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	340
20	340
40	340
60	340
80	340
100	340
120	340
140	291

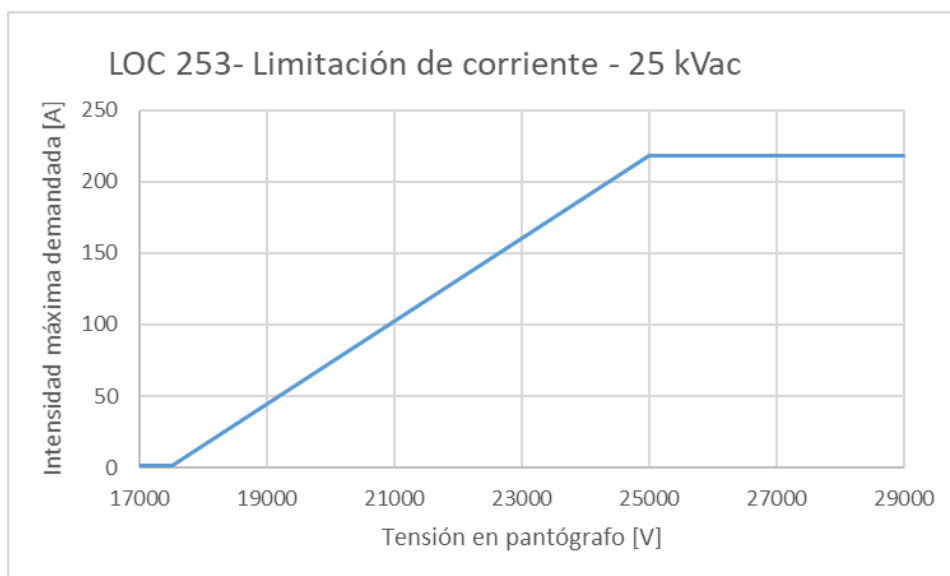


Figura 19. Limitación de corriente demandada LOC 252

4.4.2.2. ALVIA S130

Para los servicios de transporte de viajeros se ha considerado el material rodante ALVIA 130, cuyas características se detallan a continuación:



Figura 20. ALVIA S130

Tabla 16. Características del material rodante ALVIA S130

ELT 121	
Peso total del convoy	312x2
Masa del tren a plena carga	343x2
Potencia de tracción (kW)	4800x2
Potencia auxiliar (kW)	400x2

ELT 121	
Velocidad máxima (km/h)	200
Aceleración máxima de servicio (m/s^2)	0,55
Deceleración máxima de servicio (m/s^2)	-0,55
Limitación de corriente	Según Figura 21

Tabla 17. Curva del esfuerzo de tracción del material rodante ALVIA S130

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	320
20	320
40	320
60	320
80	320
90	320
100	288
120	240
140	206
160	180
180	160
200	144

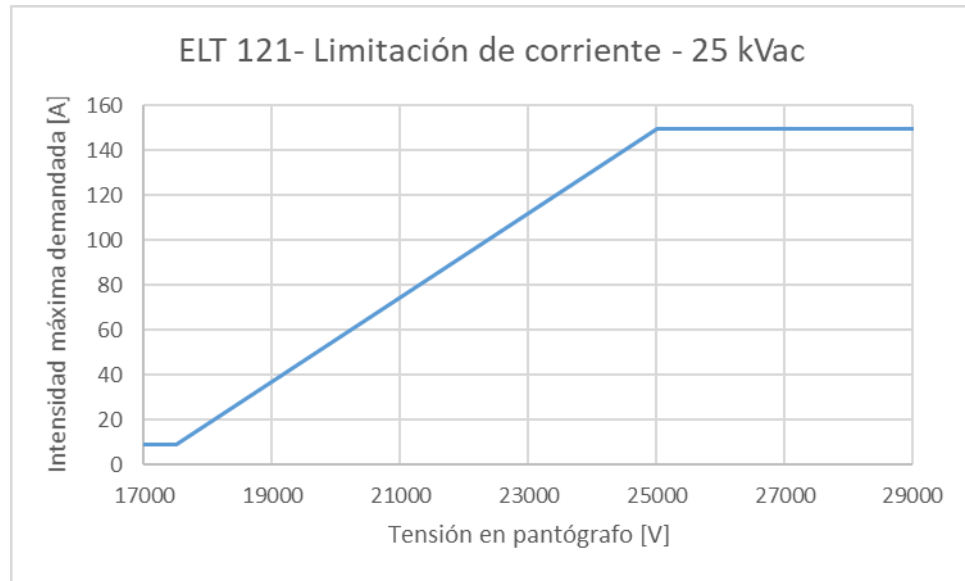


Figura 21. Limitación de corriente demandada ALVIA S130

El tramo considerado en esta simulación es de vía simple y única, por lo que no requiere definir los tramos implicados, ya que abarca desde Puertollano hasta Mérida.

Por otro lado, sí que interesa contextualizar las subestaciones de tracción y los ATIs/ATFs que aparecerán en la simulación, los cuales se describen a continuación:

Tabla 18. Puntos kilométricos e ID de las diferentes subestaciones de tracción

ID	Potencia [MVA]	Pk [km]
SET 1	2 x 30	226+500
SET 2	2 x 30	284+700
SET 3	2 x 30	366+200
SET 4	2 x 30	438+200

Tabla 19. Ubicación de los ATI/ATF

ID	Potencia [MVA]	Pk [km]
ATI 2	1x10	237+265
ATF 1	2x10	255+250
ATI 3	1x10	274+500
ATI 4	1x10	304+000
ATF 2	2x10	323+000
ATI 5	1x10	356+400
ATI 6	1x10	389+750
ATF 3	2x10	404+300
ATI 7	1x10	425+600
ATF 4	2x10	448+100

4.4.3. Tranvía

En cuanto a la simulación de tranvía, se ha decidido seleccionar una vía situada en Toronto, Canadá, más exactamente en la región de Finch. Esta línea de tranvía es de corriente continua a 750 Voltios, de vía doble, los lados de la cual se llaman 'East Bound' y 'West Bound'.

En este caso solo se usa un tipo de material rodante, el cual se describe a continuación:

Tabla 20. Características del material rodante Spirit 404

ALSTOM Citadis Spirit 404	
Peso total del convoy	81,2 t
Masa del tren a plena carga	105,0 t
Potencia de tracción (kW)	1345 kW

Potencia auxiliar (kW)	79,3 kW
Velocidad máxima (km/h)	80 km/h
Aceleración máxima de servicio (m/s ²)	1.2 m/s ²
Deceleración máxima de servicio (m/s ²)	-1.34
Limitación de corriente	0.014497

Tabla 21. Curva velocidad-esfuerzo del material rodante

Velocidad [km/h]	Esfuerzo [kN]
0.00	155.40
27.59	155.40
30.00	147.35
40.00	108.05
50.00	78.56
60.00	59.26
70.00	44.17
80.00	33.28

Las subestaciones de tracción se definen a continuación:

Tabla 22. Subestaciones de tracción de la simulación de Finch

Subestación	pk [m]
TPSS #1	3+400
TPSS #2	4+880
TPSS #3	5+890

TPSS #4	7+780
TPSS #5	9+690
TPSS #6	10+650
TPSS #7	12+320
TPSS #8	13+600

Todas ellas con dos grupos transformadores y rectificadores con una potencia total de 2000 kW.

4.4.4. Metro

En la siguiente tabla se definen las principales características del Material Rodante considerado:

Tabla 23 Características del Material Rodante

Parámetro	Valor
Nombre (Fabricante y Modelo)	CAF s5000
Peso total convoy en vacío (T)	158.79
Pasajeros máximos	826.00
Ocupación (%)	80.00
Potencia tracción (kW)	2700.00
Potencia auxiliares (kW)	145.00
Coeficiente de masas rotativas	1.10
Distancia entre ejes (mm)	1435.00
Ejes no motores	4.00
Ejes motores	16.00
Masa del tren en carga sobre la rueda motriz (kg)	5415.25
Coeficientes de Davis:	
A(kN)	2.3950000
B(Kn/km/h)	0.0182558
C(kN/km ² /h ²)	0.0005900
Rendimiento electromecánico [0,1]	0.90
Rendimiento regeneración [0,1]	0.85
Factor potencia motor (consumo)	0.90
Factor potencia motor (regeneración)	0.90
Velocidad máxima (km/h)	80.00
Aceleración max (m/s ²)	1.00

Deceleración max (m/s ²)	1.20
Aceleración tangencial sin compensar (m/s ²)	0.65
Jerk máximo (m/s ³)	0.80

Los datos presentes en la tabla anterior son los valores máximos del material rodante. No obstante, la operación real no es siempre a máximos. Cruzando con los datos de campo de velocidades medidas en las unidades de tren de la L5, se consideran los siguientes datos de operación:

Tabla 24 Parámetros de operación

Parámetro	Valor
Velocidad máxima de operación (km/h)	80.000
Aceleración de servicio(m/s ²)	0.500
Deceleración de servicio (m/s ²)	-0.500
Aceleración tangencial sin compensar (m/s ²)	0.650
Jerk de servicio (m/s ³)	0.200

Cuanto a sus curvas características de esfuerzo de tracción:

Tabla 25 Esfuerzo de tracción

Velocidad (km/h)	Esfuerzo (kN)
0	256
10	256
40	256
45	224
55	156.8
60	126.4
65	112
70	94.4
80	67.2

Por último, las subestaciones de tracción presentes en la simulación:

Tabla 26. Subestaciones de tracción del Metro L5 Barcelona

SET	PK [m]	Potencia rectificador [kVA]
Cornellà	100246. 0	2x2250
Boixeres	102510. 0	2x2250
Ernest Lluch	104701. 5	2x2250
Sants Estació	107240. 0	2x2250
Verdaguer	110351. 0	2x2250
Sagrera	113497. 0	2x2250
Fabra	115091. 0	2x2250
Vilapicina	115717. 0	2x2250
Vall Hebron	118720. 0	2x2250

4.5. Modelado de las tecnologías en OpenPowerNet

4.5.1. Tracción eléctrica

Las simulaciones eléctricas representan un 99% de las simulaciones totales que recibimos. Por tanto, es lo más típico que nos vamos a encontrar. Para el modelado de estas tecnologías, podemos recurrir al apartado 3.2.2, donde se explica claramente el modelado eléctrico, tanto en continua como en alterna.

4.5.2. Tracción por baterías/pilas de hidrógeno

Para simular lo que representaría la tracción con baterías, partiremos del mismo archivo que se ha usado para la tracción eléctrica y se deberán realizar una serie de modificaciones:

- Añadir el almacenamiento en los vehículos, con unos valores estimados y una capacidad casi infinita, para la primera iteración. Lo podemos ver en la siguiente figura:
- Modificar todo el sistema eléctrico, desconectando la catenaria de las subestaciones de tracción (para conseguir que el tren solo sea propulsado mediante la energía de sus baterías).
- Crear las zonas de carga, que serán todas aquellas zonas donde hay una subestación de tracción y una estación de parada, de manera que el tren al parar en la estación cargará su batería. En la siguiente figura podemos ver lo anteriormente mencionado mediante el esquema NMMV:
- Por último, ajustar algunos parámetros de la simulación referentes a las baterías. Los más importantes se resumen en la **Tabla 27** y se muestran en la **Figura 22**:

Tabla 27. Parámetros de la simulación por baterías en OpenPowerNet

Parámetro	Valor
Estado inicial de las baterías [%]	80
Tiempo mínimo de espera en las zonas de carga [s]	120
Mínimo porcentaje de capacidad para poder operar [%]	10
Máximo porcentaje de capacidad para poder operar [%]	90

Mínimo porcentaje de la capacidad para poder salir de una zona de carga [%]	40
---	----

Limitamos las baterías de un 10 a un 90% de su capacidad para alargar su vida útil considerablemente.

En la figura que vemos a continuación se ven todos los parámetros que se configuran por cada vehículo:

Storage	
⑧ use	true
⑧ name	Battery
⑧ initialSoc_percent	80
⑧ minSocOperation_percent	10
⑧ shareDischarge_percent	100
⑧ ocsCharge	true
⑧ chargeModel	saver
⑧ selfDischarge	none
⑧ shareCharge_percent	100
⑧ dischargeModel	storage_P_traction_ratio
⑧ maxSocOperation_percent	90
⑧ tractionRatio	0.1
⑧ minTimeStandstill_s	120
⑧ minSocDeparture_percent	40

Figura 22. Vista de los parámetros de las baterías de la ventana de OpenpowerNet

Y el modelo en visor NMMV se ve así, con sus zonas de carga en rojo y la catenaria desconectada de las subestaciones (Lo sabemos por los triángulos azules que salen en ella):

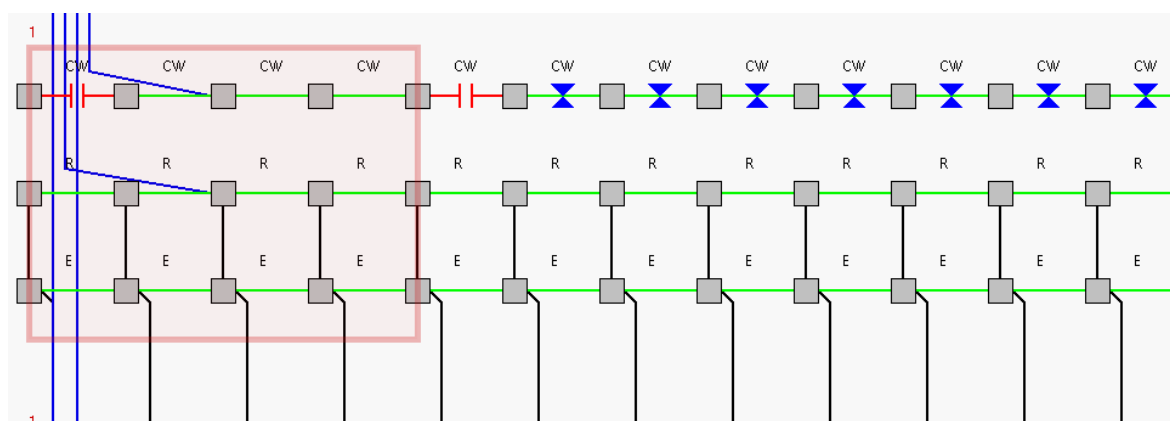


Figura 23. Vista de la catenaria sin suministro y las zonas de carga en el visor NMMV de OpenPowerNet

Una vez configurado todo, se irán haciendo iteraciones, simulando y analizando los resultados, y se irá modificando la capacidad de las baterías y las corrientes de carga/descarga hasta llegar a encontrar una situación donde la capacidad sea la mínima posible (ya que se reducirá al máximo el coste) y que los trenes puedan circular con un margen de error incluido.

4.5.3. Tracción por diésel/GLP

Después de pensarlo bien, se ha decidido que para el modelado de la tracción con motores de combustión interna se optará por introducir la infraestructura y los materiales rodantes en Open Track y realizar únicamente la simulación en este programa, sin ayuda del OpenPowerNet.

Las razones que han llevado a tomar esta decisión han sido las siguientes:

- Si en OpenPowerNet usamos un rendimiento del 35 % o similar, la línea estará tan sobrecargada que no podrá llegar a terminar la simulación o los resultados no podrán ser válidos.
- No usar regeneración es una buena razón para simular solo OpenTrack, ya que nos da como resultado la demanda que tendrían los trenes, sin tener en cuenta regeneración ni rendimientos, como se explica en el capítulo 3.

Así pues, se simulará en OpenTrack y usaremos ese resultado de energía para calcular la energía térmica real que hubiera hecho falta aplicando los rendimientos oportunos.

4.6. Resultados de las simulaciones en OpenPowerNet

4.6.1. Tren regional

4.6.1.1. Tracción eléctrica

A continuación, se muestran los resultados más significativos para la simulación de Riudecanyes. Se considera para la simulación una situación normal de operación, es decir, todas las subestaciones en servicio y las circulaciones comerciales establecidas por ADIF.

4.6.1.1.1 Caída de tensión

En la Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se pueden observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la caída de tensión en catenaria.

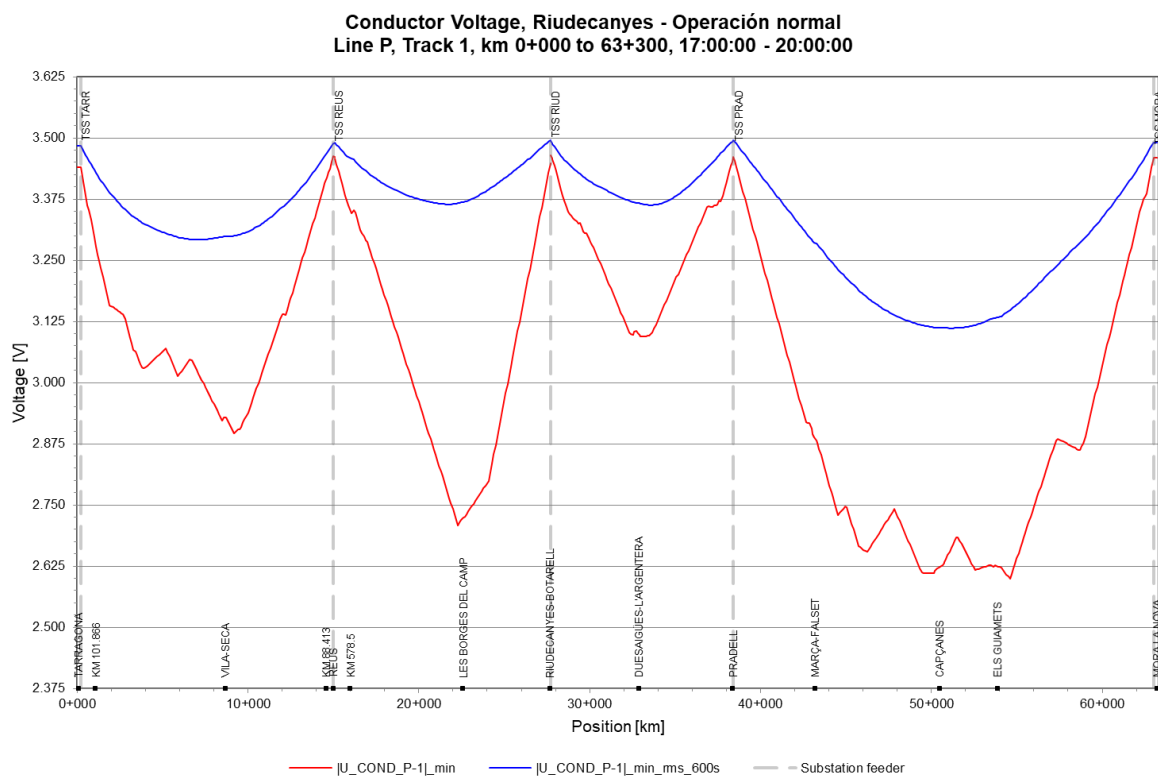


Figura 24. Nivel de tensión mínimo para la vía 1 del tramo Tarragona-Mora la Nova - Operación normal

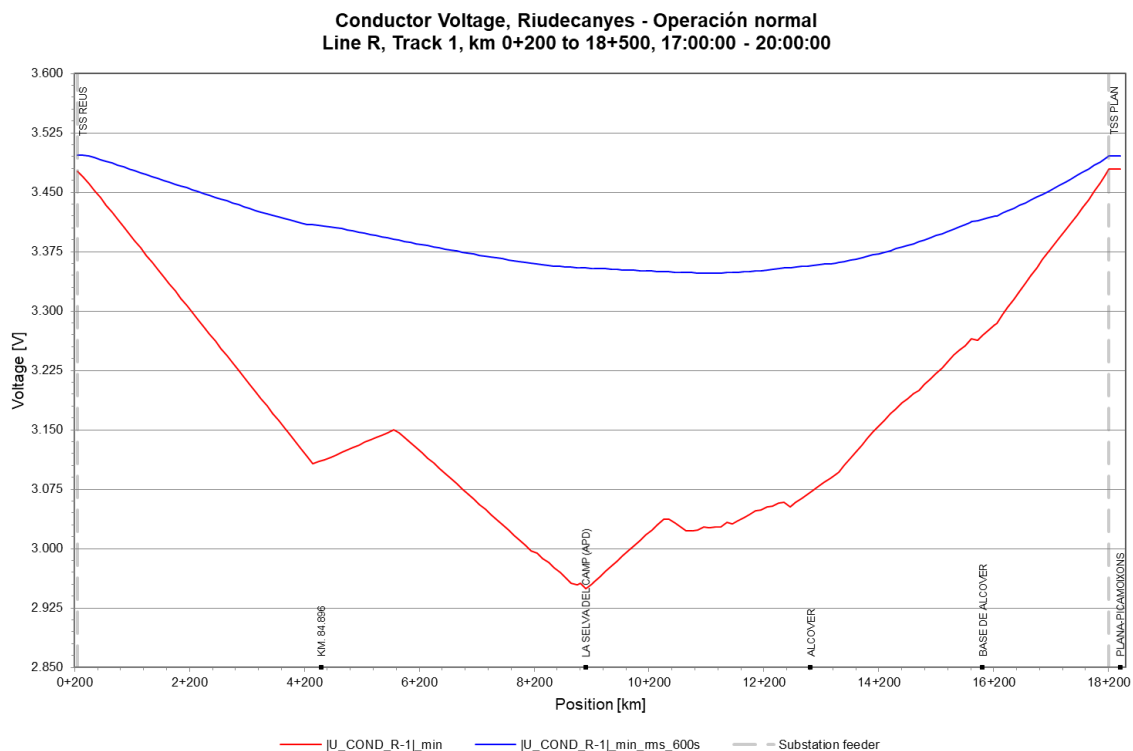


Figura 25. Nivel de tensión mínimo para la vía 1 del tramo Plana Picamoixons-Reus - Operación normal

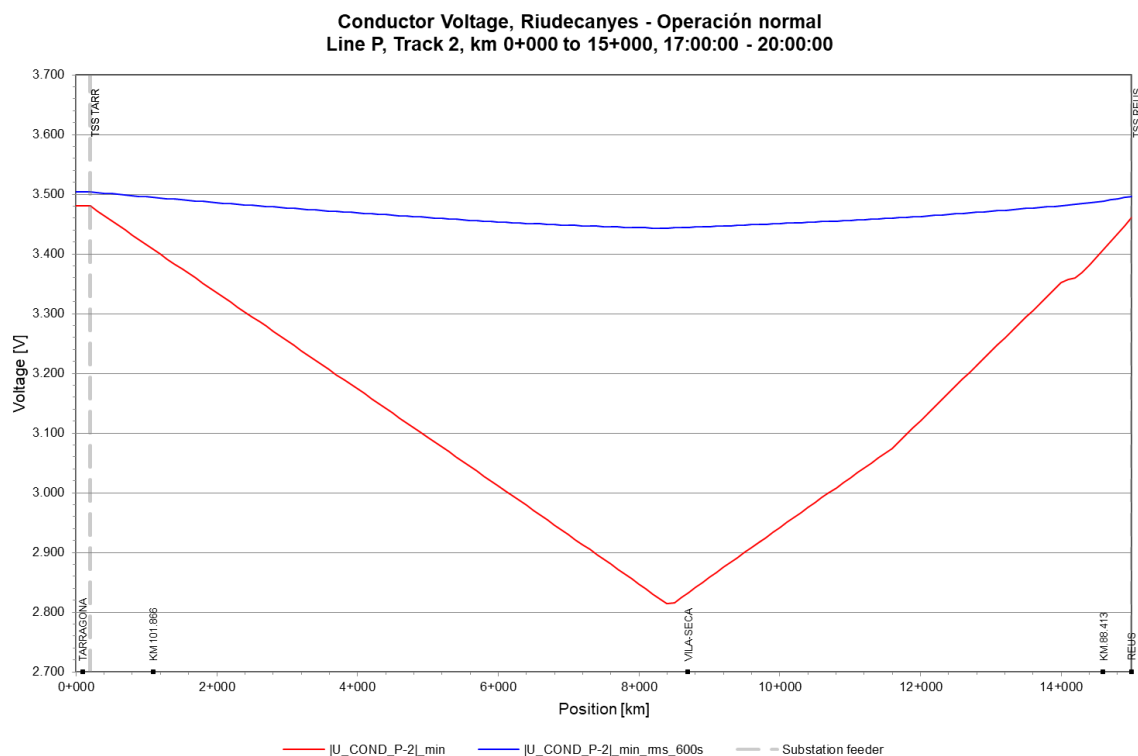


Figura 26. Nivel de tensión mínimo para la vía 2 del tramo Tarragona-Reus - Operación normal

Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, los valores mínimos empleados para certificar el cumplimiento de la normativa aplicable.

Tabla 28. Tensiones mínimas en catenaria - Operación normal

Tramo	Tensión mínima en catenaria [V]		
Tarragona-Mora la Nova	Vía 1	Instantánea	2598,99
		RMS 10 min	3148,52
Plana Picamoixons-Reus	Vía 1	Instantánea	2949,67
		RMS 10 min	3354,39
Tarragona-Reus	Vía 2	Instantánea	2813,81
		RMS 10 min	3443,68

4.6.1.1.2 Tensión carril – tierra

En la Figura 27, Figura 28 y Figura 29 se pueden observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la tensión del carril respecto el nivel de tierra.

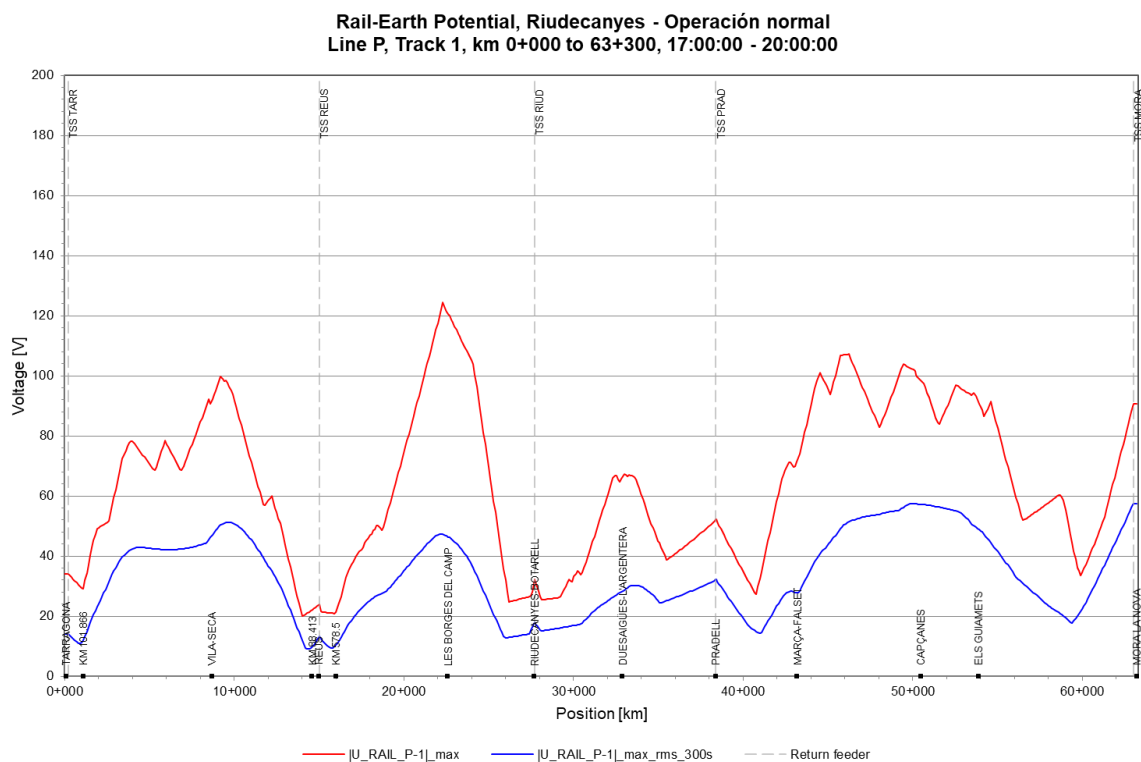


Figura 27. Nivel de tensión máximo en el carril de la vía 1 del tramo Tarragona-Mora la Nova - Operación normal

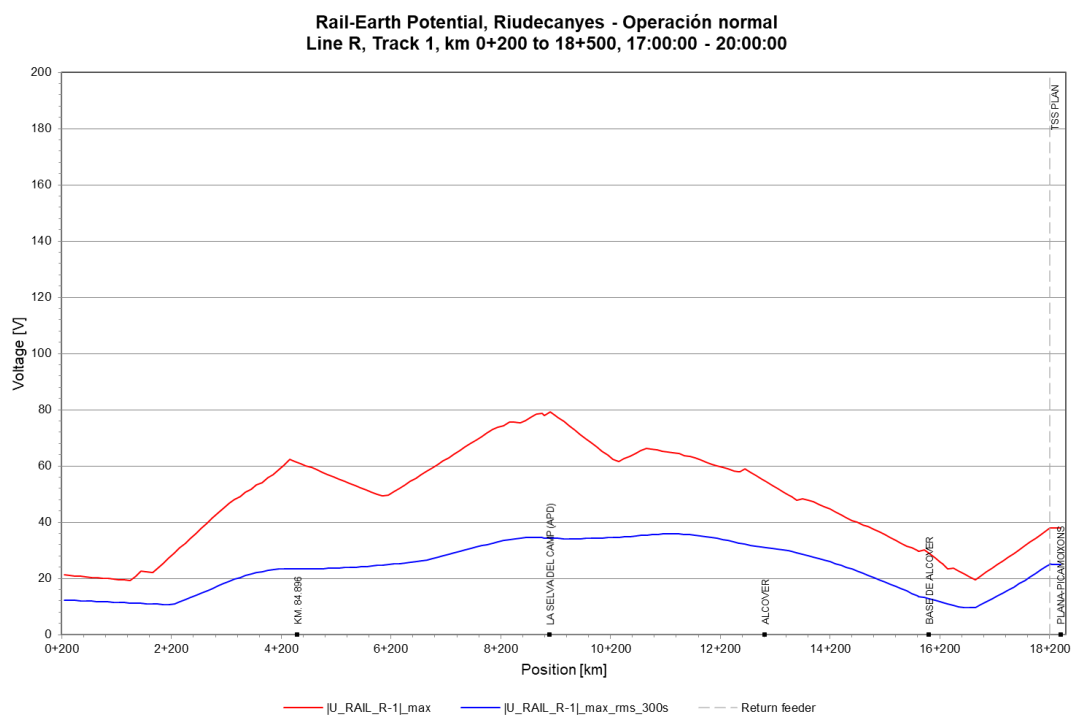


Figura 28. Nivel de tensión máximo en el carril de la vía 1 del tramo Plana Picamoixons-Reus - Operación normal

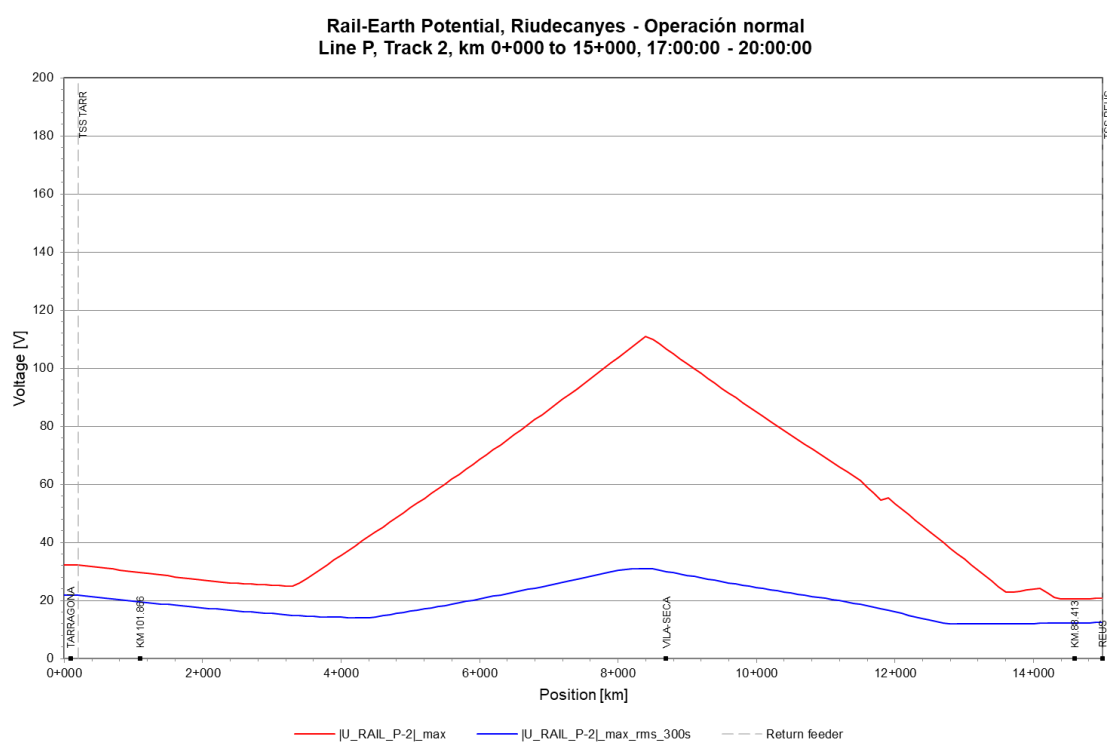


Figura 29. Nivel de tensión máximo en el carril de la vía 2 del tramo Tarragona-Reus- Operación normal

Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, el valor máximo por vía, empleado para certificar el cumplimiento de la normativa aplicable al encontrarse dentro de los límites de la Tabla 43.

Tabla 29. Tensiones máximas carril – tierra - Operación normal

Tramo		Tensión máxima carril – tierra [V]	
		Instantánea	RMS 5 minutos
Tarragona – Mora la Nova	Vía 1	124,3	57,5
Plana Picamoixons-Reus	Vía 1	79,3	35,8
Tarragona-Reus	Vía 2	111,0	31,0

4.6.1.1.3 Potencia en las subestaciones

La siguiente figura muestra una representación gráfica de las potencias máximas demandadas por cada una de las subestaciones en el escenario analizado. En ella se diferencian cuatro parámetros de potencia: instantánea, RMS 5', RMS 15' y RMS 2h.

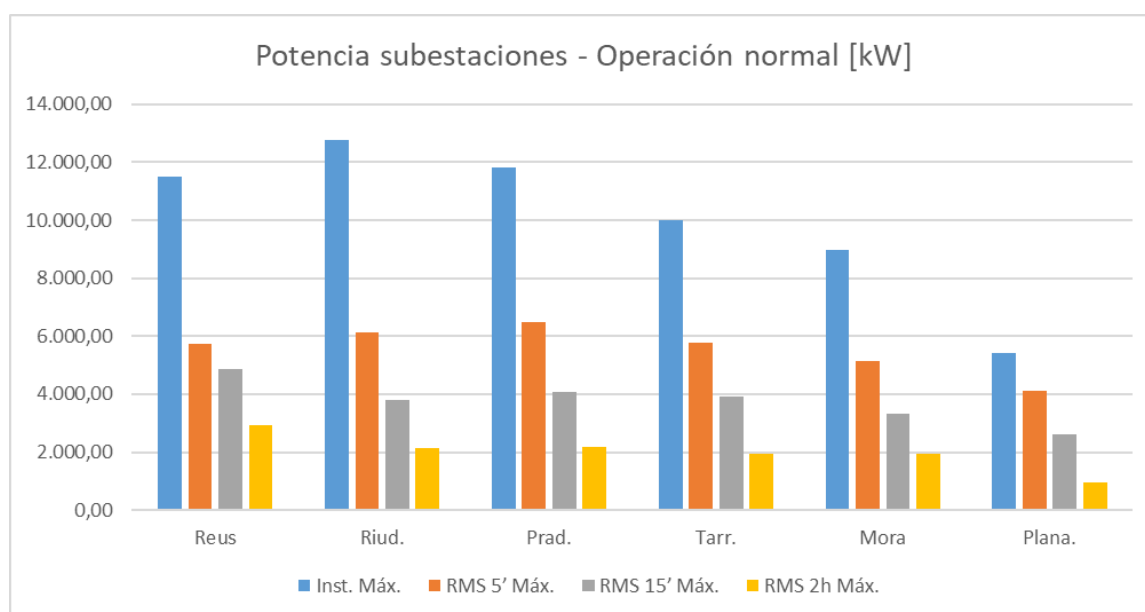


Figura 30. Potencias demandadas máximas – Operación normal

4.6.1.1.4 Energía demandada

A continuación, se adjunta una tabla con la energía demandada durante toda la simulación y el tiempo de duración de la misma, para ofrecer un resultado más representativo:

Tabla 30. Energía total entregada y tiempo de la simulación de Riudecanyes – Operación normal

Energía total entregada por las subestaciones de tracción [kWh]	Tiempo total de simulación [h]
13.092	3

La energía contempla únicamente lo que ha salido de las subestaciones hacia la catenaria. Por tanto, las pérdidas están incluidas, así como la regeneración de los trenes. El tiempo de simulación se ha escogido por la conveniencia a los horarios de los trenes.

4.6.1.2. Tracción por baterías/Pilas de hidrógeno

En este caso se han sufrido muchos problemas en la simulación. A los 25 minutos 3 segundos de simulación, el simulador no podía converger y superaba sus iteraciones máximas (se han probado hasta 10.000). Es muy probable que sea debido a la complejidad de la simulación (ya que tiene ramales y tramo principal) añadiendo que la tracción con baterías es mucho más compleja.

A continuación, vemos una gráfica del poco tiempo que se ha podido simular, y como se ve de momento los materiales rodantes que habían (que no eran todos) parecía que todo marchaba como debería.

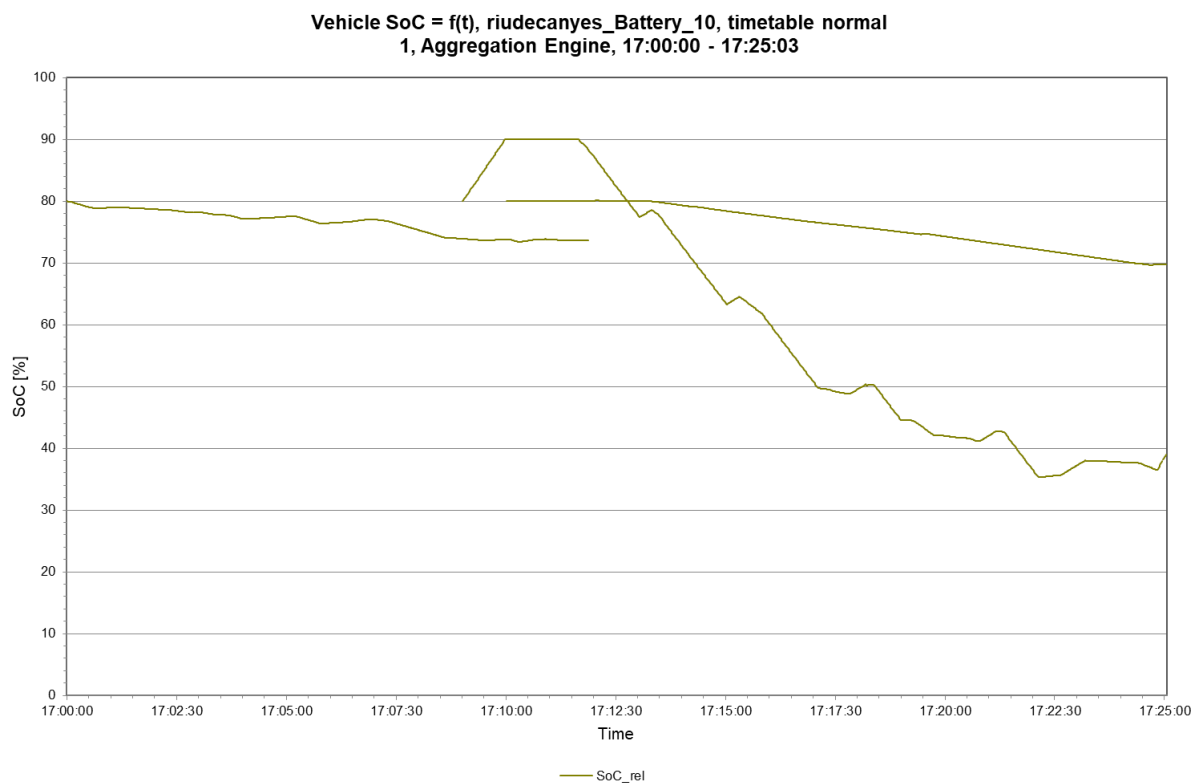


Figura 31. Estado de la batería de todos los materiales rodantes a lo largo de la simulación de Riudecanyes

Como se ha simulado tan poco y con solo 3 trenes, la energía demandada que se ha obtenido ha sido de 169 kWh solamente.

Aun así, se ha podido ajustar la capacidad de las baterías necesaria para llegar a todos los puntos de la línea sin llegar al 10% de la capacidad, por cada material rodante:

Tabla 31. Capacidades óptimas de las baterías de cada material rodante

Material Rodante	Capacidad óptima [kWh]
ELT 448	1.500
LOC 253	1.000
UT 470	1.200
LOC 289	2.000
UT 440	400

4.6.1.3. Tracción por diésel/GLP

Como se ha comentado en la sección sobre el modelado, el resultado útil para la tracción por Diésel o GLP es la energía pura necesaria para mover los trenes ofrecida por OpenTrack por sí solo, la cual ha sido de **14.325 kWh**.

4.6.2. Tren de alta velocidad

4.6.2.1. Tracción eléctrica

A continuación, se muestran los resultados más significativos para la simulación de Puertollano-Mérida. Se considera para la simulación una situación normal de operación, es decir, todas las subestaciones en servicio y las circulaciones comerciales establecidas por ADIF.

4.6.2.1.1 Caída de tensión

En la Figura 32 se puede observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la caída de tensión en catenaria. Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, los valores extremos (máximo y mínimo).

Tabla 32. Tensiones mínimas en catenaria – operación normal

Tramo	Tensión mínima en catenaria [V]		
	Vía 1	Instantánea	24.474,0
Puertollano - Mérida		RMS 10 min	26.721,7

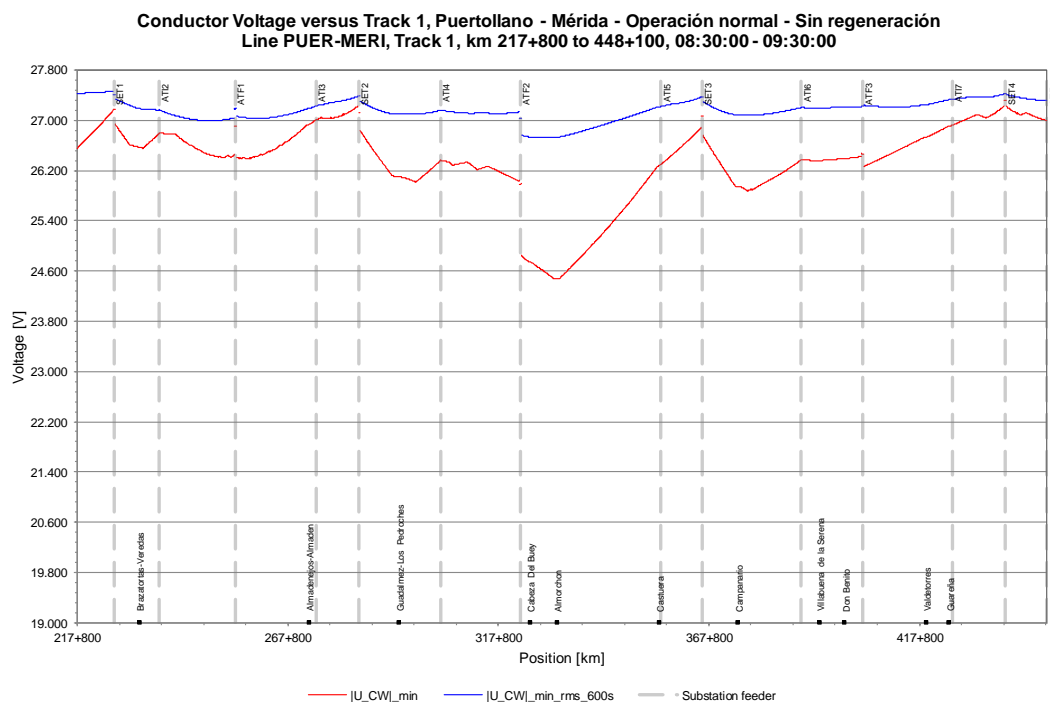


Figura 32. Tensiones mínimas para la vía 1 – Operación normal

4.6.2.1.2 Tensión carril-tierra

En la Figura 33 se puede observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la tensión del carril respecto el nivel de tierra. Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, el valor máximo por vía, empleado para certificar el cumplimiento de la normativa aplicable.

Tabla 33. Tensiones máximas carril-tierra – Operación normal

Tramo	Tensión máxima carril-tierra [V]		
Puertollano - Mérida	Vía 1	Instantánea	57,4
		RMS 5 min	29,9

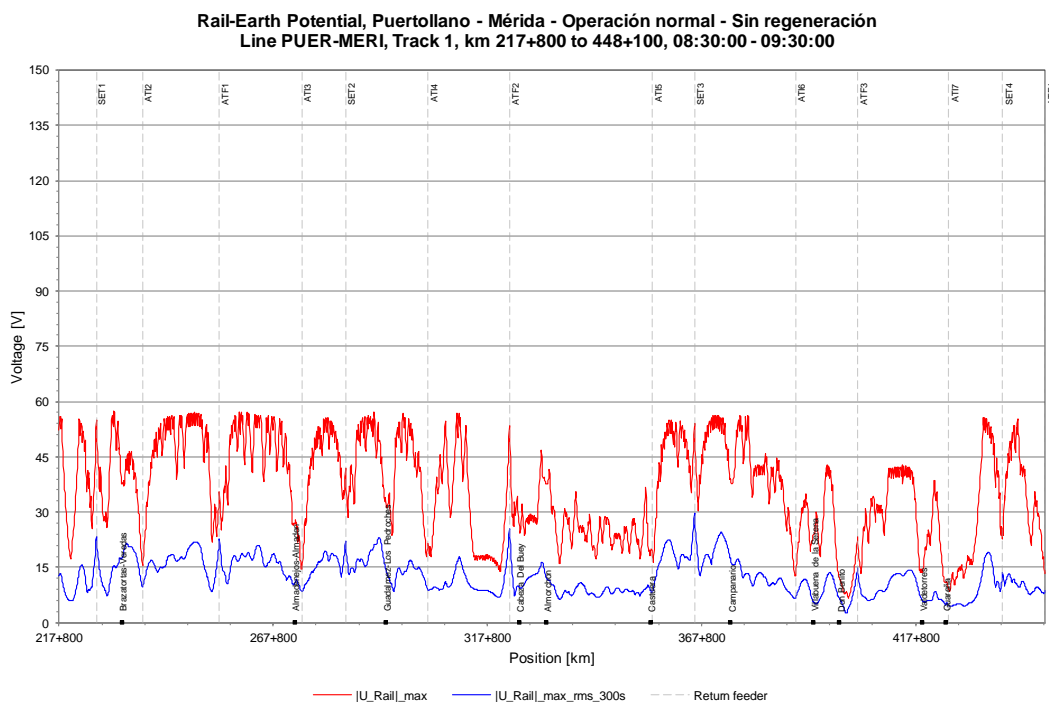


Figura 33. Tensiones máximas carril-tierra para la vía 1 – Operación normal

4.6.2.1.3 Potencias en subestaciones

La siguiente figura muestra una representación gráfica de las potencias máximas demandadas por cada una de las subestaciones en el escenario analizado. En ella se diferencian cuatro parámetros de potencia: instantánea, RMS 5', RMS 15' y RMS 1h.

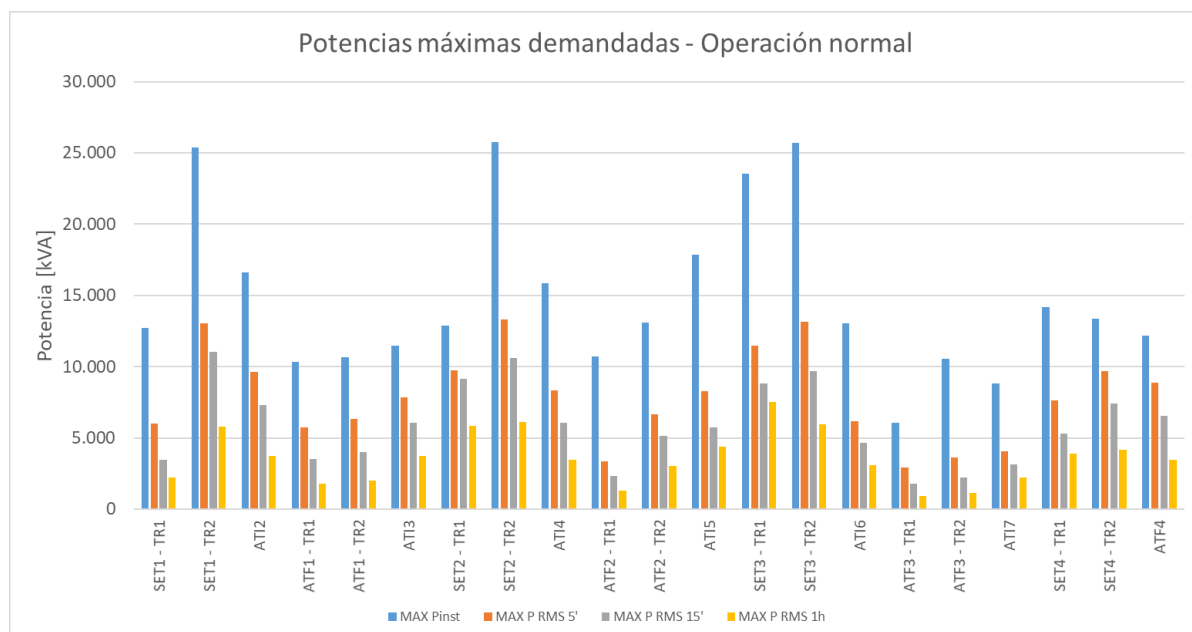


Figura 34. Potencias demandadas máximas – Operación normal

4.6.2.1.4 Energía demandada

A continuación, se adjunta una tabla con la energía demandada durante toda la simulación y el tiempo de duración de la misma, para ofrecer un resultado más representativo:

Tabla 34. Energía total entregada y tiempo de la simulación de Puertollano – Operación normal

Energía total entregada por las subestaciones de tracción [kWh]	Tiempo total de simulación [h]
41.597	1

La energía contempla únicamente lo que ha salido de las subestaciones hacia la catenaria. Por tanto, las pérdidas están incluidas, así como la regeneración de los trenes. El tiempo de simulación se ha escogido por la conveniencia a los horarios de los trenes.

4.6.3. Tranvía

4.6.3.1. Tracción eléctrica

A continuación, se muestran los resultados más significativos para la simulación de Finch. Se considera para la simulación una situación normal de operación, es decir, todas las subestaciones en servicio y las circulaciones comerciales establecidas por ALSTOM.

4.6.3.1.1 Caída de tensión

En la Figura 35 y Figura 36 se pueden observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la caída de tensión en catenaria.

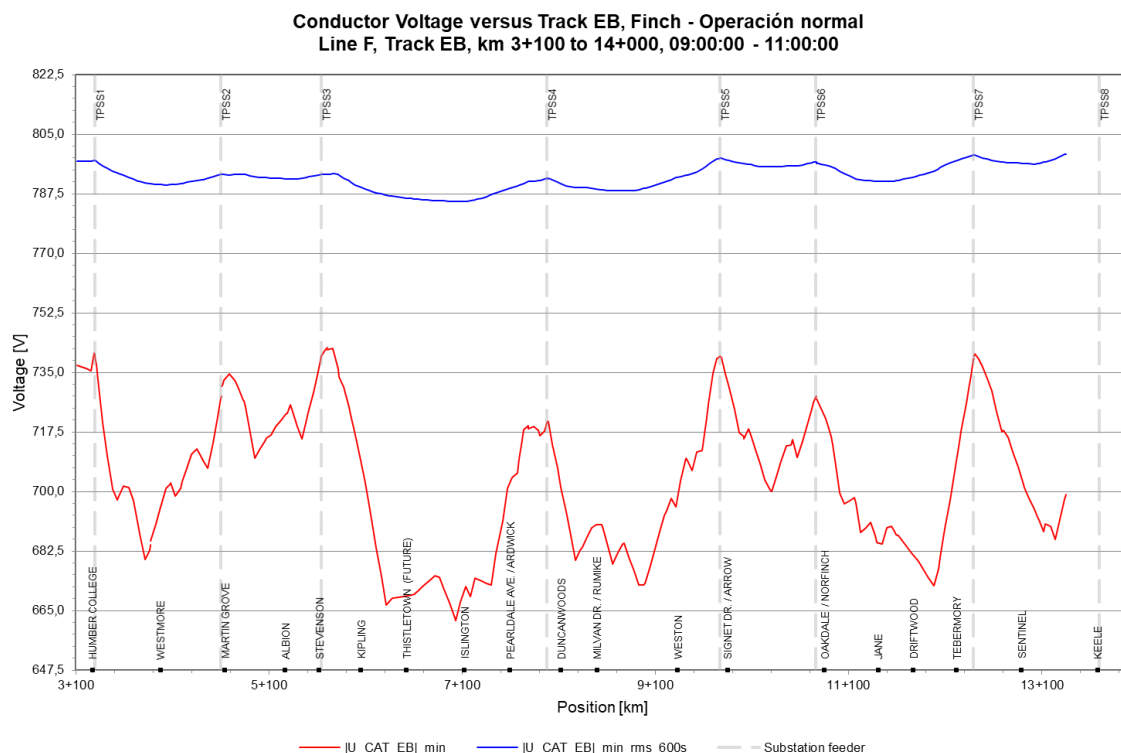


Figura 35. Tensión mínima en catenaria para la vía 1 – operación normal

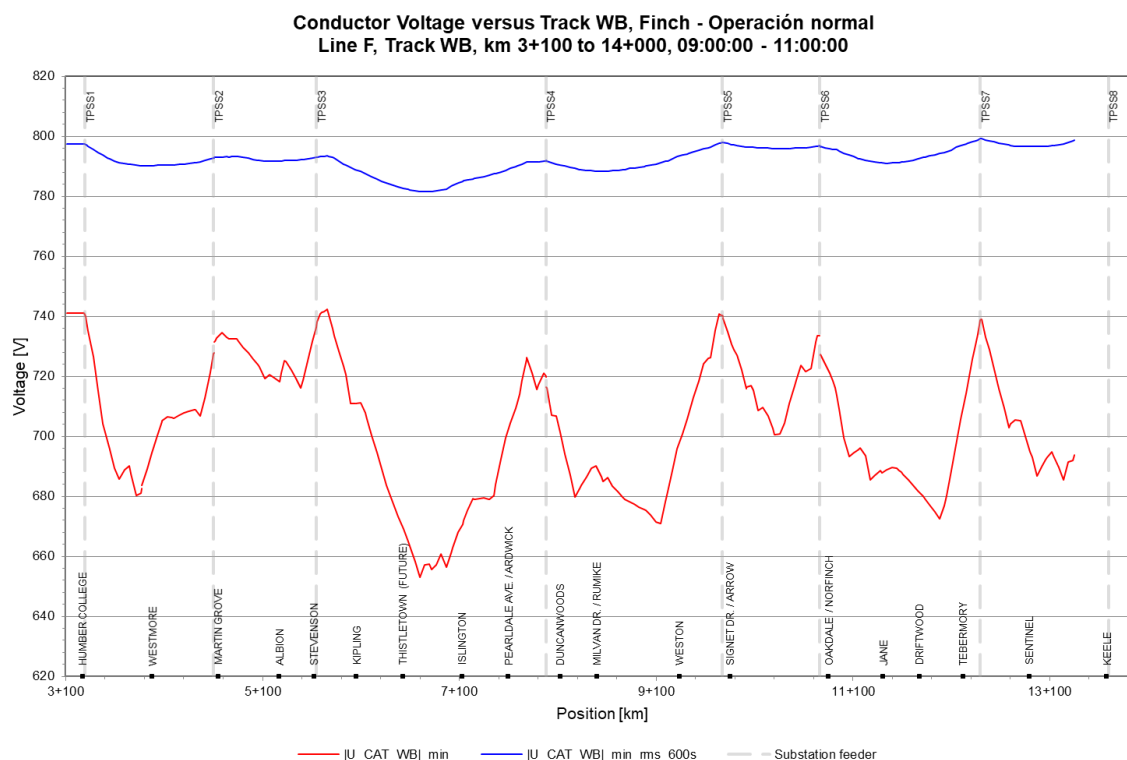


Figura 36. Tensión mínima en catenaria para la vía 2 – operación normal

Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, los valores mínimos empleados para certificar el cumplimiento de la normativa aplicable.

Tabla 35. Tensiones mínimas en catenaria - Operación normal

Tensión mínima en catenaria [V]		
Est Bound	Instantánea	662,038
	RMS 10 min	785,186
West Bound	Instantánea	652,903
	RMS 10 min	781,528

4.6.3.1.2 Tensión carril – tierra

En la Figura 37 y Figura 38 se pueden observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la tensión del carril respecto el nivel de tierra.

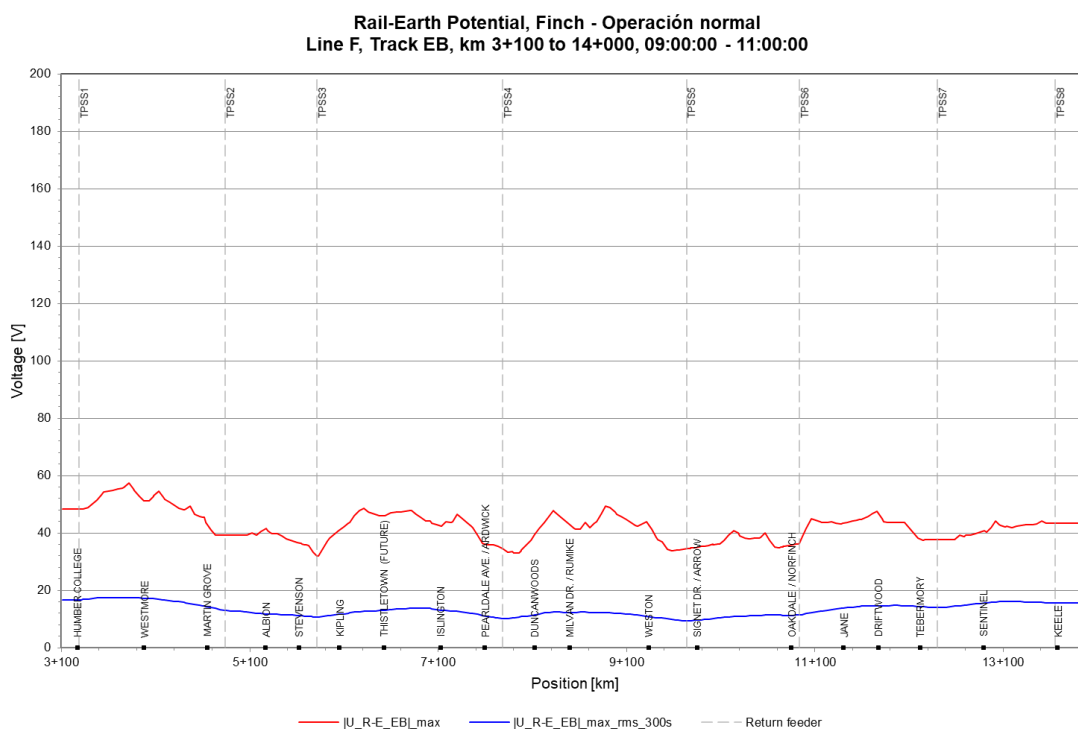


Figura 37. Tensión máxima carril – tierra para la vía 1 – operación normal

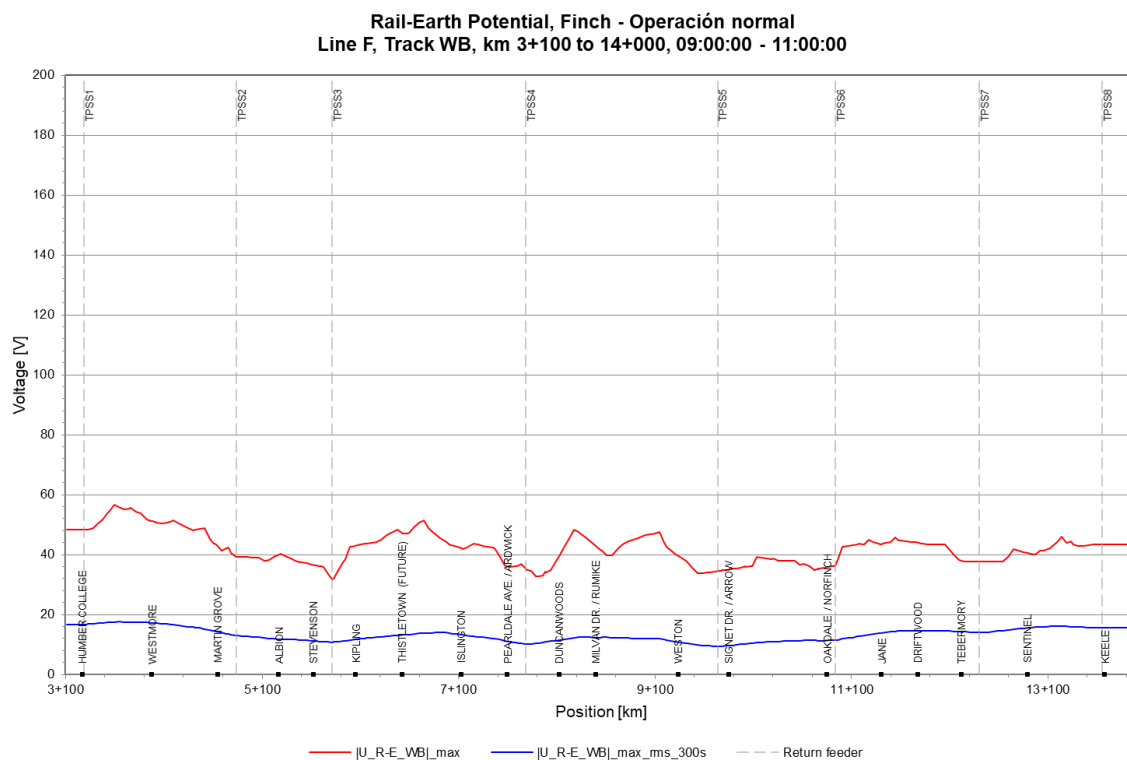


Figura 38. Tensión máxima carril – tierra para la vía 2 – operación normal

Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, el valor máximo por vía, empleado para certificar el cumplimiento de la normativa aplicable.

Tabla 36. Tensiones máximas carril – tierra - Operación normal

Tensión máxima carril-tierra [V]		
East Bound	Instantánea	57,553
	RMS 5 min	17,522
West Bound	Instantánea	56,735
	RMS 5 min	17,563

4.6.3.1.3 Potencia en las subestaciones

La siguiente figura muestra una representación gráfica de las potencias máximas demandadas por cada una de las subestaciones en el escenario analizado. En ella se diferencian cuatro parámetros de potencia: instantánea, RMS 5', RMS 15' y RMS 2h.

Tabla 37. Potencias demandadas máximas – Operación normal

	MAX Pot 1" [kW]	MAX Pot RMS 15" [kW]	MAX Pot RMS 60" [kW]	MAX Pot RMS 15' [kW]	Max Pot RMS 2h [kW]
TPSS#1	2.057	1.971	1.154	568	522
TPSS#2	2.191	1.697	1.010	673	627
TPSS#3	2.337	1.734	1.114	820	761
TPSS#4	2.783	2.286	1.438	1.016	933
TPSS#5	2.405	1.742	1.107	768	712
TPSS#6	2.472	1.703	1.048	734	686
TPSS#7	2.196	1.819	1.089	734	676
TPSS#8	2.241	1.557	933	504	462

4.6.3.1.4 Energía demandada

A continuación, se adjunta una tabla con la energía demandada durante toda la simulación y el tiempo de duración de la misma, para ofrecer un resultado más representativo:

Tabla 38. Energía total entregada y tiempo de la simulación de Finch – Operación normal

Energía total entregada por las subestaciones de tracción [kWh]	Tiempo total de simulación [h]
5.487	2

La energía contempla únicamente lo que ha salido de las subestaciones hacia la catenaria. Por tanto, las pérdidas están incluidas, así como la regeneración de los trenes. El tiempo de simulación se ha escogido por la conveniencia a los horarios de los trenes.

4.6.3.2. Tracción por baterías/Pilas de hidrógeno

En este caso se ha podido simular perfectamente el comportamiento de las baterías. En las dos siguientes figuras comprobamos los ciclos de carga y descarga de todos los materiales rodantes, viendo que el máximo se establece en 90 % y al mínimo que llegan es al 15 % aproximadamente, sabiendo así que la capacidad escogida es la adecuada:

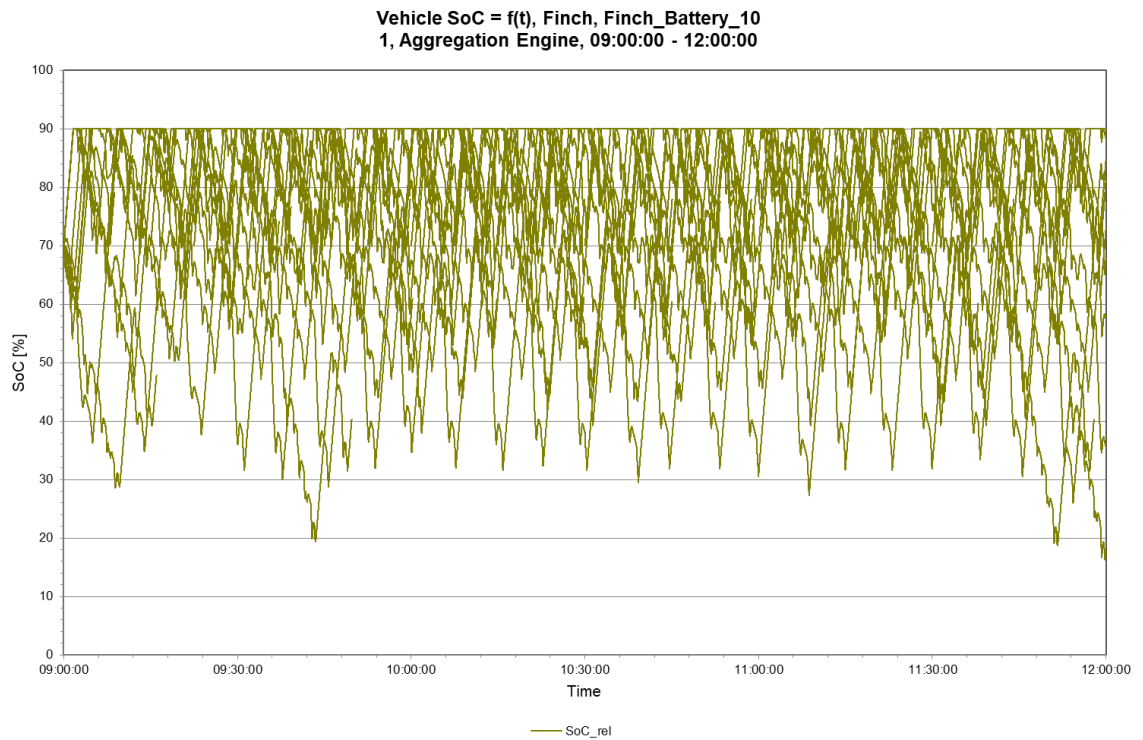


Figura 39. Estado de las baterías de todos los materiales rodantes durante la simulación

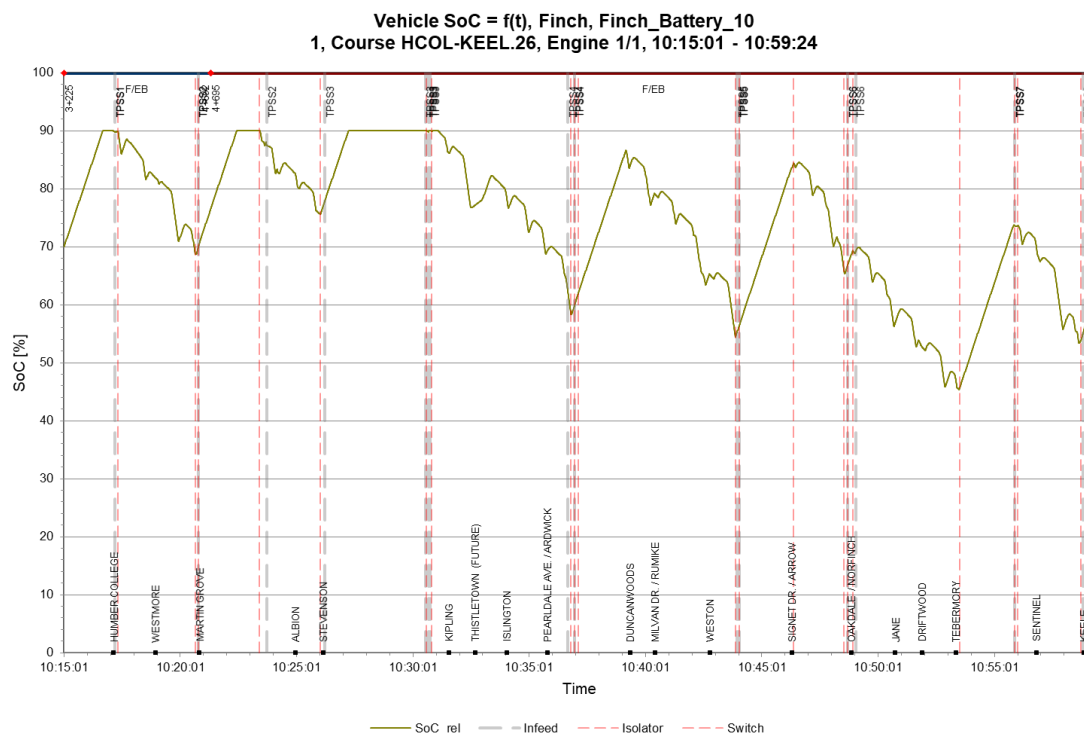


Figura 40. Estado de la batería de un material rodante en específico durante la simulación

Además, la energía requerida para la simulación ha sido de 7.960 kWh y la capacidad óptima de **70 kWh**.

4.6.3.3. Tracción por diésel/GLP

El resultado de energía requerida usando únicamente OpenTrack ha sido de **7.793 kWh**.

4.6.4. Metro

4.6.4.1. Tracción eléctrica

A continuación, se muestran los resultados más significativos para la simulación del Metro L5 de Barcelona. Se considera para la simulación una situación normal de operación, es decir, todas las subestaciones en servicio y las circulaciones comerciales establecidas por ADIF.

4.6.4.1.1 Caída de tensión

En la Figura 41 y Figura 42 se pueden observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la caída de tensión en catenaria.

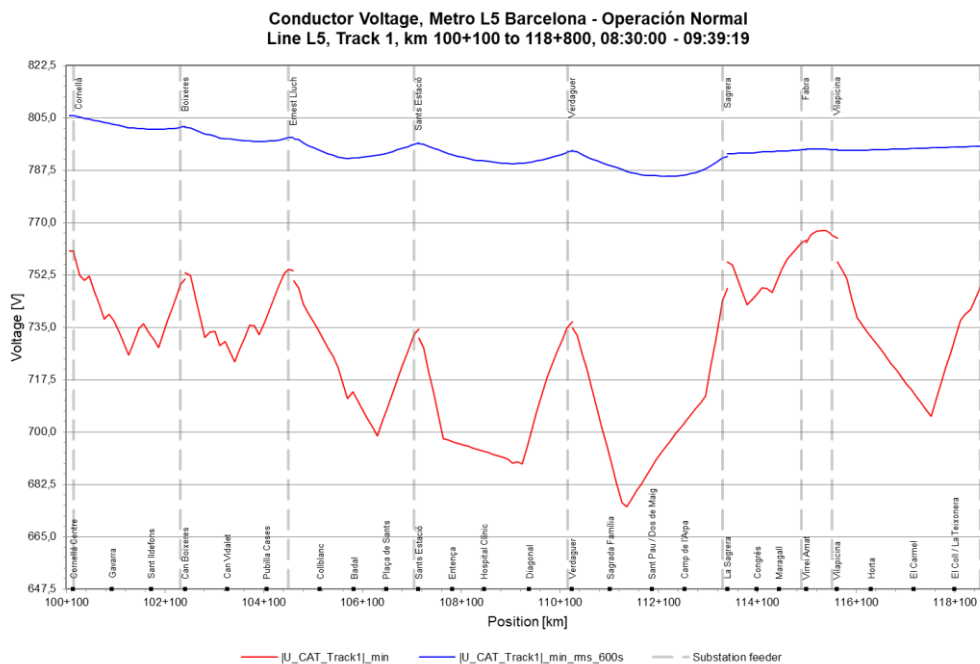


Figura 41. Nivel de tensión mínimo para la vía 1 - Operación normal

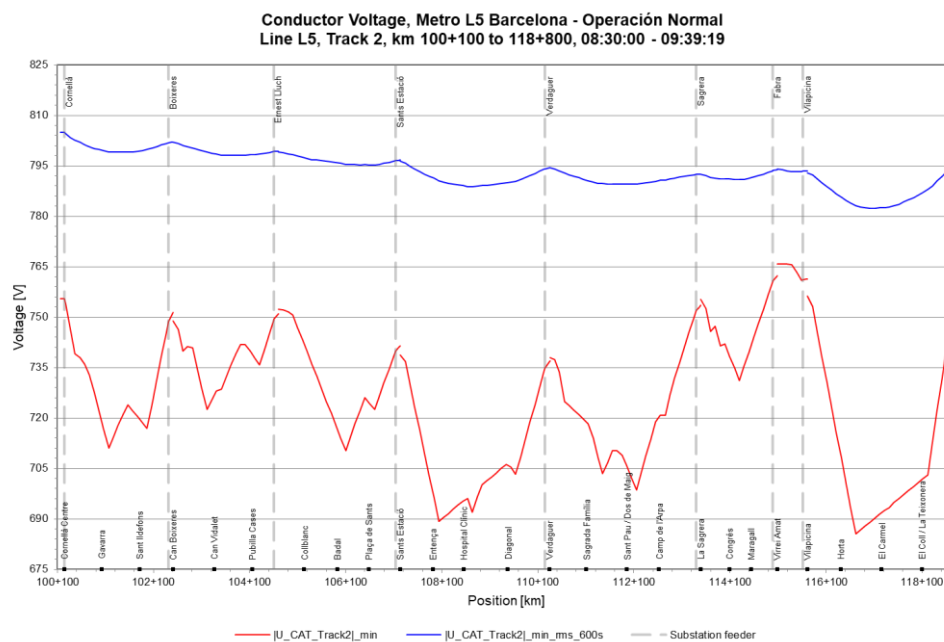


Figura 42. Nivel de tensión mínimo para la vía 2 - Operación normal

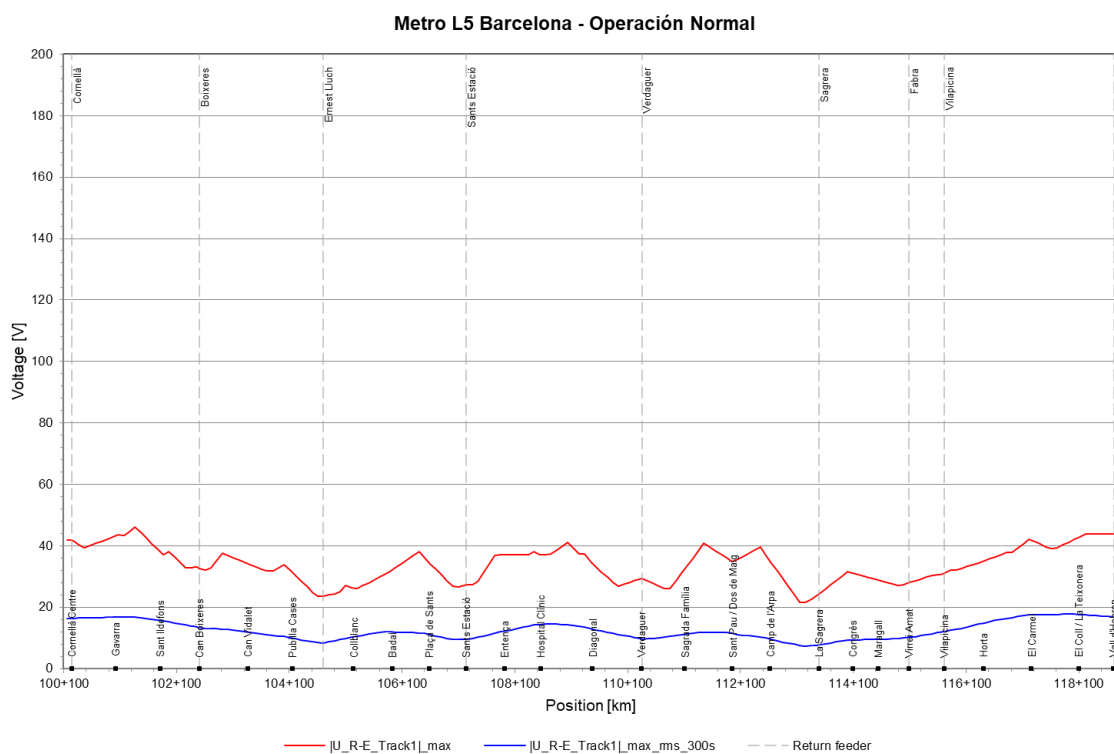
Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, los valores mínimos empleados para certificar el cumplimiento de la normativa aplicable.

Tabla 39. Tensiones mínimas en catenaria - Operación normal

Tramo	Tensión mínima en catenaria [V]		
Tarragona-Mora la Nova	Vía 1	Instantánea	767,35
		RMS 10 min	785,502
Tarragona-Reus	Vía 2	Instantánea	685,53
		RMS 10 min	782,436

4.6.4.1.2 Tensión carril – tierra

En la Figura 43 y Figura 44 se pueden observar los resultados de la simulación eléctrica en lo relativo a la tensión del carril respecto el nivel de tierra.

**Figura 43.** Nivel de tensión máximo en el carril de la vía 1 - Operación normal

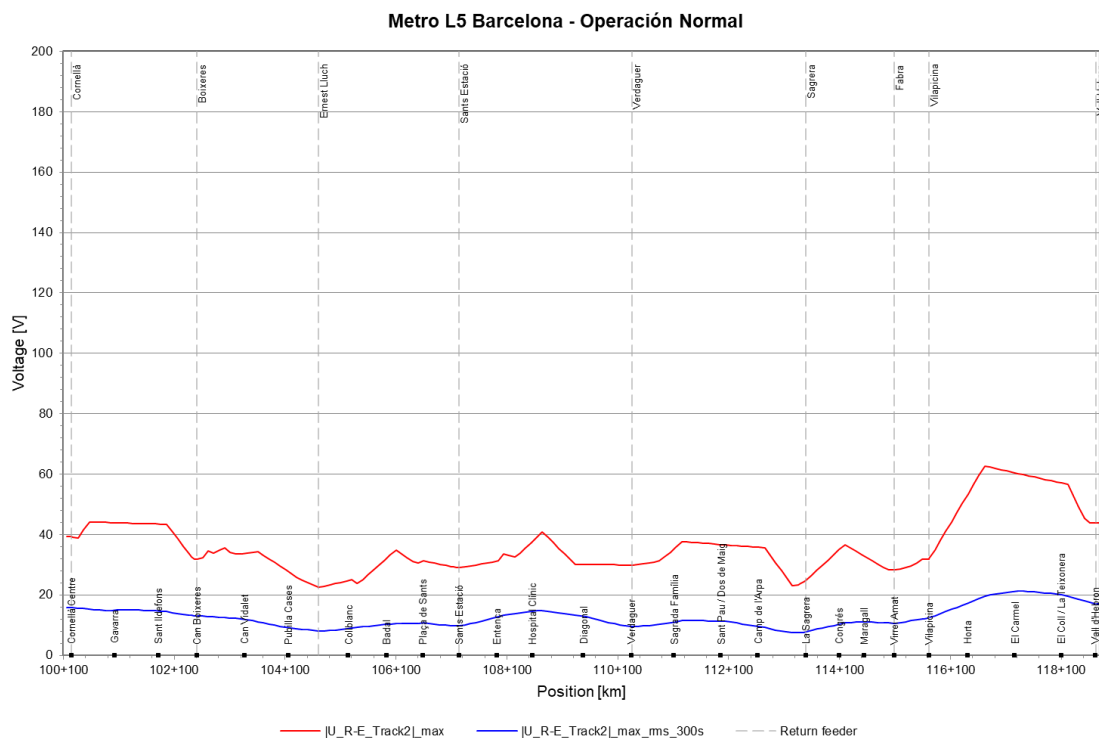


Figura 44. Nivel de tensión máximo en el carril de la vía 2 - Operación normal

Los datos de la siguiente tabla muestran, a modo de resumen, el valor máximo por vía, empleado para certificar el cumplimiento de la normativa aplicable al encontrarse dentro de los límites de la Tabla 43.

Tabla 40. Tensiones máximas carril – tierra - Operación normal

Tramo		Tensión máxima carril – tierra [V]	
		Instantánea	RMS 5 minutos
Tarragona – Mora la Nova	Vía 1	46,151	17,689
Tarragona-Reus	Vía 2	62,716	21,388

4.6.4.1.3 Potencia en las subestaciones

La siguiente figura muestra una representación gráfica de las potencias máximas demandadas por cada una de las subestaciones en el escenario analizado. En ella se diferencian cuatro parámetros de potencia: instantánea, RMS 5', RMS 15' y RMS 2h.

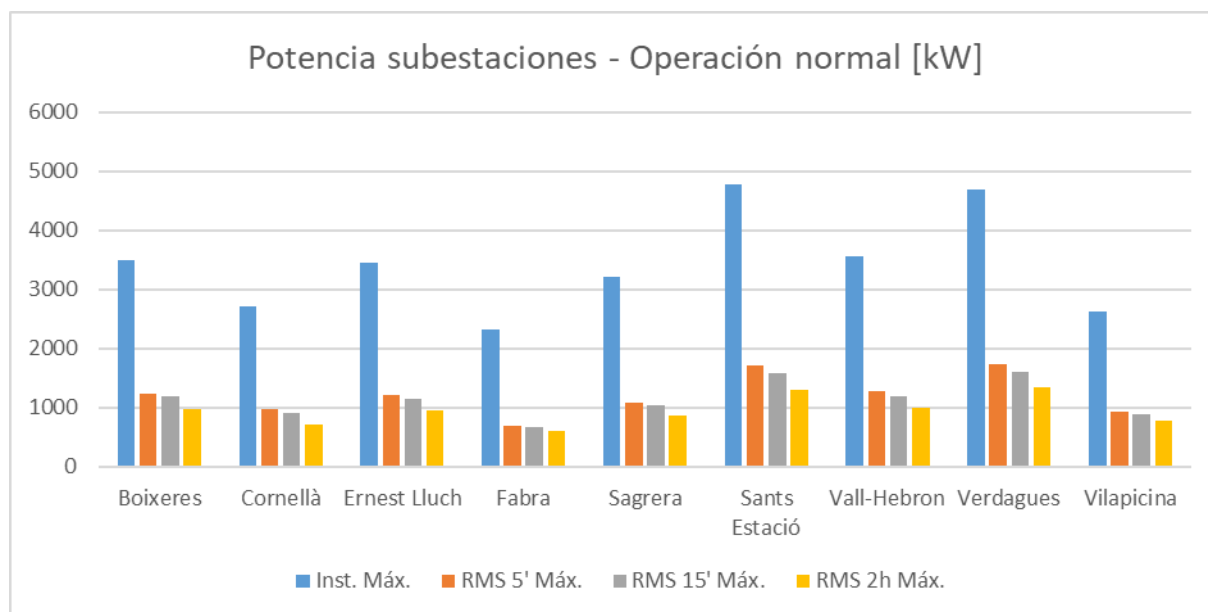


Figura 45. Potencias demandadas máximas – Operación normal

4.6.4.1.4 Energía demandada

A continuación, se adjunta una tabla con la energía demandada durante toda la simulación y el tiempo de duración de la misma, para ofrecer un resultado más representativo:

Tabla 41. Energía total entregada y tiempo de la simulación del Metro L5 Barcelona – Operación normal

Energía total entregada por las subestaciones de tracción [kWh]	Tiempo total de simulación [h]
6.120	1h 39 min

La energía contempla únicamente lo que ha salido de las subestaciones hacia la catenaria. Por tanto, las pérdidas están incluidas, así como la regeneración de los trenes. El tiempo de simulación se ha escogido por la conveniencia a los horarios de los trenes.

4.6.4.2. Tracción por baterías/Pilas de hidrógeno

A continuación, se muestran dos figuras del estado de las baterías de todos los servicios y de uno en particular a lo largo de la simulación.

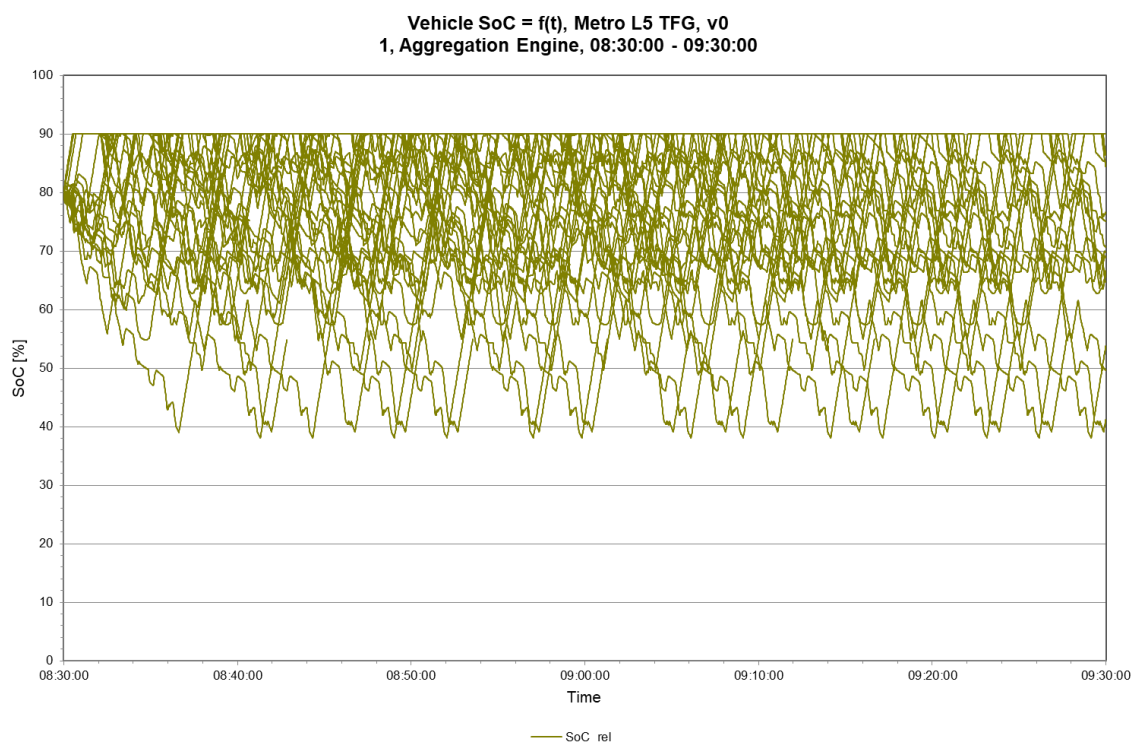


Figura 46, Estado de las baterías a lo largo de la simulación de todos los materiales rodantes

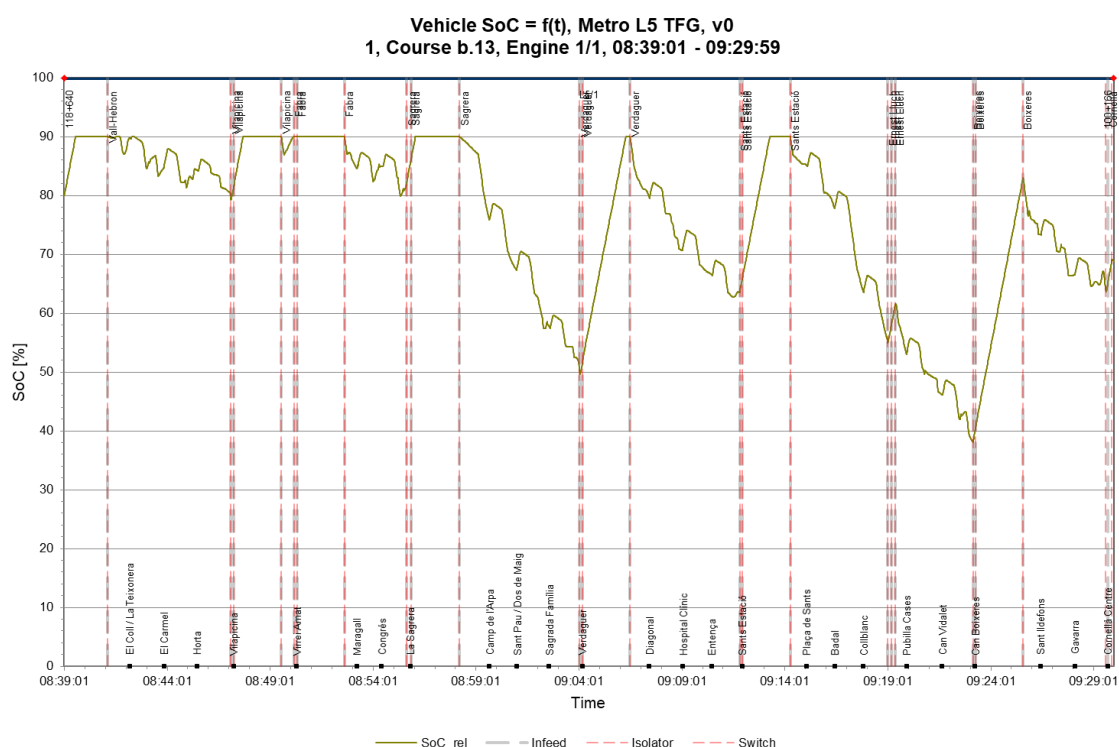


Figura 47. Estado de la beteria de un único material rodante durante la simulación

Además, se obtiene una energía requerida de **6.285 kWh**.

4.6.4.3. Tracción por diésel/GLP

En el caso de la simulación del Metro, el resultado de energía necesaria de OpenTrack ha sido de **6.375 kWh**.

4.7. Análisis de los resultados

4.7.1. Tren regional

4.7.1.1. Tracción eléctrica

Para la validación de los resultados de la simulación de tracción, se define la siguiente normativa aplicable:

4.7.1.1.1 Tensión en catenaria

La tensión nominal de la línea es 3.000 Vcc. Por tanto, según la norma EN 50163 *Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de las redes de tracción*, los valores característicos de este nivel de tensión son los siguientes:

Tabla 42. Tensiones características según EN 50163

Parámetro	Nivel de tensión [V]
Tensión nominal (U_n)	3.000
Tensión permanente mínima (U_{min1})	2.000
Tensión permanente máxima (U_{max1})	3.600
Tensión no permanente máxima (U_{max2})	3.900

4.7.1.1.2 Tensión carril – tierra

Los valores máximos de la tensión entre carril y tierra vienen determinados por la norma EN 50122-1 *Aplicaciones de ferrocarriles – Instalaciones fijas. Parte 1: Medidas de protección relacionada con la seguridad eléctrica y la puesta a tierra* y se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 43. Tensiones máximas admisibles según EN 50122-1

Tiempo [s]	Nivel de tensión [V]
>300	120
300	150
1	160
0,9	165
0,8	170
0,02	870

4.7.1.1.3 Sobrecarga de los grupos de tracción

La sobrecarga admisible para los grupos de tracción de las subestaciones (transformador y rectificadores) viene determinada por la clase de servicio normalizada, decretada en la respectiva especificación técnica.

En el caso del transformador empleado, según la especificación técnica ET 03.359.101.7:

Clase de servicio normalizada IXA de la norma UNE-EN 50329, que establece las siguientes capacidades:

- 1,0 veces la corriente básica.
- 1,5 veces la corriente básica durante 2 horas, partiendo del régimen anterior (a).
- 3,0 veces la corriente básica durante 5 minutos, partiendo del régimen anterior (b).

Para los rectificadores estudiados, según la especificación técnica ET 03.359.104.1:

Clase de servicio normalizada IX de la norma UNE-EN 50328, que establece las siguientes capacidades:

- 1,0 veces la corriente básica.
- 1,5 veces la corriente básica durante 2 horas, partiendo del régimen anterior (a).
- 3,0 veces la corriente básica durante 5 minutos, partiendo del régimen anterior (b).

En la tabla mostrada abajo se encuentran resumidos los valores obtenidos en la simulación, así como los rangos según normativa:

Pn (Potencia nominal)= 3.000 kW/3.300 kVA

Tabla 44. Comprobación de la normativa

Parámetro	Valor Simulación	Requerimiento normativa
Tensión mínima en catenaria instantánea	2.598,99 V	2.000 V
Tensión permanente mínima en catenaria	3.148,52 V	2.000 V
Tensión carril-tierra máxima instantánea (1s)	79,3 V	160 V
Tensión carril tierra RMS 5'	31,0 V	120 V
Potencia máxima de un grupo de tracción instantánea	≈13.000 kW	<3*Pn (5')
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 15'	≈4.900 kW	<1,5*Pn (2h)
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 2h	≈2.900 kW	<1*Pn (permanente)

Vemos que los valores de tensión obtenidos en la simulación entran dentro de los límites establecidos por la norma.

Las sobrecargas de los grupos de tracción han sido comparadas siempre teniendo en cuenta el valor más restrictivo de la simulación, de manera que el valor de norma de 5 minutos se compara con el instantáneo de la simulación, el de 2h se compara con el de 15 minutos de la simulación y el permanente con una RMS 2h de simulación. Se ha decidido hacer así para asegurar que se cumple también el siguiente límite más cercano. Si tenemos en cuenta que los grupos de tracción son de 3.000 kW o 3.300 kVA, vemos que se cumplen los requerimientos, aunque la RMS 2h de unos 2.900 kW se acerca mucho a los 3.000 kW que marca la norma.

4.7.1.2. Tracción por baterías/Pilas de hidrógeno

En este caso no tenemos una normativa aplicable a trenes por baterías o pilas de hidrógeno, así que nos limitaremos a analizar los resultados según ciclos de carga y descarga, capacidad de operación, etc.

Del estudio del tren regional no se pueden sacar muchas conclusiones ya que no se ha completado la simulación de la forma correcta. Además, tampoco tenemos la energía que se hubiera necesitado para la simulación. Así pues, se decide coger el 95% de la energía de la simulación eléctrica, teniendo en cuenta que se evitan las pérdidas por efecto julio en catenaria que podrían suponer del orden del 5%.

La energía supuestamente requerida para la simulación con baterías es de **12.437,4 kWh** en una simulación de 3 horas. Lo que sí podemos deducir es que la capacidad que necesitan los trenes es descomunal por el hecho de que las subestaciones se encuentran a casi 20 km de distancia.

En cuanto a las pilas de hidrógeno, para calcular la cantidad de hidrógeno necesario primero vemos que sucede en la reacción química:

- Reacción en el ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Reacción del cátodo: $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
- Reacción global: $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$

Sabemos que entonces, cada molécula de H_2 nos aporta 2 electrones, y cada electrón nos aporta la energía de 1 electrónvoltio, que se traduce a $1,602177E-19$ Julios.

Además, tenemos que cada molécula de H_2 tiene una masa molar de 2,01588 g/mol. Asumiendo un rendimiento medio de las pilas de hidrógeno del 50%, realizamos el factor de conversión:

$$\begin{aligned} \frac{13.092 \text{ kWh}}{\text{Sim}} * \frac{1000 \text{ Wh}}{1 \text{ kWh}} * \frac{3600 \text{ J}}{1 \text{ Wh}} * \frac{1 e^-}{1,602177E-19 \text{ J}} * \frac{1 \text{ molécula } H_2}{2 e^-} * \frac{1}{0,5} \\ * \frac{1 \text{ mol } H_2}{6,022E23 \text{ moléculas } H_2} * \frac{2,01588 \text{ g } H_2}{1 \text{ mol } H_2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 935,50 \text{ kg } H_2 \end{aligned}$$

4.7.1.3. Tracción por diésel/GLP

Para una tracción con motores térmicos, únicamente nos será de interés la cantidad de combustible consumido en los trayectos, puesto que las únicas restricciones aplicables serán en manera de emisiones de gases nocivos para el medioambiente.

Como se comenta en la sección anterior, se ha realizado la simulación únicamente con OpenTrack y la demanda energética pura ha sido de **14.325 kWh**. Esta energía se considera pura ya que saldrá de una sola fuente energética (el combustible fósil) y será transformada en mecánica y eléctrica, sin contar regeneración.

La siguiente tabla resume el proceso para convertir esa energía en cantidad de combustible fósil:

Tabla 45. Cálculo de la cantidad de combustible

Tipo de combustible	Rendimiento del tipo de motor [%]	Energía necesaria del combustible [kWh]	PCI [Gj/t]	Cantidad de combustible [t]
Diésel	32	44765,625	42,4	3,80
GLP	35	40928,57143	45,5	3,24

4.7.2. Tren de alta velocidad

4.7.2.1. Tracción eléctrica

Para la validación de los resultados de la simulación de tracción, se define la siguiente normativa aplicable:

4.7.2.1.1 Tensión en catenaria

En este caso, la tensión nominal de la línea es 25.000 Vac. Por tanto, según la norma EN 50163 *Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de las redes de tracción*, los valores característicos de este nivel de tensión son los siguientes:

Tabla 46. Tensiones características en electrificaciones de 25000 V AC según EN 50163

Parámetro	Nivel de tensión [V]
Tensión nominal (Un)	25.000
Tensión permanente mínima (Umin1)	19.000
Tensión permanente máxima (Umax1)	27.500
Tensión no permanente máxima (Umax2)	29.000
Tensión no permanente mínima (Umin2)	17.500

4.7.2.1.2 Tensión carril – tierra

Los valores máximos de la tensión entre carril y tierra vienen determinados por la norma EN 50122-1 *Aplicaciones de ferrocarriles – Instalaciones fijas. Parte 1: Medidas de protección relacionada con la seguridad eléctrica y la puesta a tierra* y se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 47. Tensiones máximas admisibles en electrificaciones de 25000 V AC según EN 50122-1

Tiempo [s]	Nivel de tensión [V]
>300	60
300	65
1	75
0,9	80
0,8	85

4.7.2.1.3 Sobrecarga de los grupos de tracción

La sobrecarga admisible para los grupos de tracción de las subestaciones (transformador y/o autotransformador) viene determinada por la clase de servicio normalizada, decretada en la respectiva especificación técnica.

En el caso del transformador empleado, según la especificación técnica ET 03.359.504.2:

- Clase de servicio normalizada IXB de la norma UNE-EN 50329, que establece las capacidades indicadas en la Tabla 48.

En el caso del autotransformador empleado, según la especificación técnica ET 03.359.505.9:

- Clase de servicio normalizada IXB de la norma UNE-EN 50329, que establece las capacidades indicadas en la Tabla 48.

Tabla 48. Ciclo de carga admisible para la clase de servicio IXB según UNE-EN 50329

Apartado	Condición inicial	p.u. de I_N	Duración	Intervalo
a	-	0,658	Permanente	
b	a	1,315	2 horas	3 horas
c	b	1,937	300 s	1.800 s

En este último caso, se revisará la potencia en vez de la corriente de los grupos de tracción, ya que son proporcionales y esos resultados son más representativos.

A continuación, encontramos una tabla resumen de los valores obtenidos en la simulación en comparativa a la normativa:

$P_n = 30$ MVA

Tabla 49. Comprobación de la normativa

Parámetro	Valor Simulación	Requerimiento normativa
Tensión mínima en catenaria instantánea	24.474,0 V	17.500 V
Tensión permanente mínima en catenaria RMS 10'	26.721,7 V	19.000 V
Tensión carril-tierra máxima instantánea (1s)	57,4 V	75 V
Tensión carril tierra RMS 5'	29,9 V	60 V
Potencia máxima de un grupo de tracción instantánea	≈26.000 kVA	<1,937*P _n kVA (RMS 300s)
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 5'	≈14.000 kVA	<1,315*P _n kVA (RMS 2h)
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 1h	≈7.500 kVA	<0,658*P _n kVA (Permanente)

Como vemos en la tabla, las tensiones están todas dentro de los límites permisibles en la normativa. Sobre las potencias en los grupos de tracción, se ha comparado siempre un valor de simulación con el más restrictivo de la norma, de manera que, si ese valor se cumple, los inferiores también. Por ejemplo, se compara el valor instantáneo de la simulación con el valor RMS 300s de la norma, por lo que, si cumple ese, cumpliría también el instantáneo, puesto que ese será siempre mayor al RMS 300s.

Teniendo en cuenta que cada grupo de tracción es de 30 MVA, vemos que se cumplen muy sobradamente todas estas últimas restricciones.

4.7.3. Tranvía

4.7.3.1. Tracción eléctrica

Para la validación de los resultados de la simulación eléctrica del tranvía de Finch se toman los siguientes requerimientos:

4.7.3.1.1.1 Tensión en catenaria

La tensión en catenaria deberá mantenerse dentro de los valores seguros de funcionamiento, que se encuentran descritos en la normativa proporcionada por ALSTOM:

- Máxima tensión en catenaria: 900 Vdc
- Máxima tensión de regeneración: 900 Vdc
- Tensión nominal: 750 Vdc
- Mínima tensión en catenaria: 500 Vdc

4.7.3.1.1.2 Carga de los rectificadores

Los rectificadores son capaces de soportar períodos de sobrecarga establecidos en la IEEE 1653.2 (Para transformadores de tracción) y en la IEEE C57.18.10 (Para rectificadores de tracción). En acorde a estas normas, las sobrecargas máximas de los grupos de tracción son las siguientes:

- 100% de corriente de carga en continuo
- 150% de corriente de carga por períodos de dos (2) horas
- Cinco períodos del 300% de corriente de carga durante 1 minuto, en el período de dos horas.
- Un período del 450% de la corriente de carga por 15 segundos, en el período de dos horas.

Se tiene en cuenta que, al decir corriente, se refiere también a potencia ya que son proporcionales.

4.7.3.1.1.3 Tensión Carril-Tierra

En la norma EN 50122-1 se especifican los valores máximos de tensión carril-tierra, tanto RMS 5 minutos como en continua:

- Operación normal: 50 Vdc (RMS 300s)
- Operación normal: 160 Vdc (instantánea)

A continuación, la tabla resumen de valores de la simulación y normativa:

$P_n = 2.000 \text{ kW}$

Tabla 50. Comprobación de la normativa

Parámetro	Valor Simulación	Requerimiento normativa
Tensión mínima en catenaria instantánea	652,903 V	500 V
Tensión permanente mínima en catenaria	781,528 V (RMS 10')	500 V
Tensión carril-tierra máxima instantánea (1s)	57,553 V	160 V
Tensión carril tierra RMS 5'	17,563 V	50 V
Potencia máxima de un grupo de tracción instantánea	2783 kW	$<4,5 \cdot P_n$ (15s)
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 15s	2286 kW	$<3 \cdot P_n$ (1min)
Potencia máxima de un grupo de tracción 15'	1016 kW	$<1,5 \cdot P_n$ (2h)
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 2h	933 kW	$<1 \cdot P_n$ (Permanente)

Vemos que nos encontramos también dentro de los rangos admisibles de tensión. En cuanto a las potencias, que se han comparado de igual manera que en los otros apartados, y teniendo en cuenta que los grupos son de 2.000 kW, se cumple también la restricción de sobrecarga en los grupos de tracción.

4.7.3.2. Tracción por baterías/Pilas de hidrógeno

En cuanto a la parte que refiere a las baterías, los resultados nos indican que se está operando de la manera más óptima, con ciclos de carga-descarga que son del 20 % en la mayoría de casos, pero llegando a un mínimo del 15 % de la capacidad máxima en algún punto, lo que indica que la capacidad seleccionada de 70 kWh es la ideal.

En este caso la energía necesaria para la simulación de 3 horas ha sido de 7.960 kWh, que ya cuadra con los aproximados 5.500 kWh que salió en la simulación eléctrica de 2 horas.

Para el cálculo de la cantidad de Hidrógeno necesario en las pilas de hidrógeno, se hará exactamente igual que se ha hecho anteriormente, con factores de conversión:

$$\frac{7960 \text{ kWh}}{\text{Sim}} * \frac{1000 \text{ Wh}}{1 \text{ kWh}} * \frac{3600 \text{ J}}{1 \text{ Wh}} * \frac{1 \text{ e}^-}{1,602177E-19 \text{ J}} * \frac{1 \text{ molécula H}_2}{2 \text{ e}^-} * \frac{1}{0,5} \\ * \frac{1 \text{ mol H}_2}{6,022E23 \text{ moléculas H}_2} * \frac{2,01588 \text{ g H}_2}{1 \text{ mol H}_2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 598,73 \text{ kg H}_2$$

4.7.3.3. Tracción por diésel/GLP

Como se comenta en la sección anterior, se ha realizado la simulación únicamente con OpenTrack y la demanda energética pura ha sido de **7.793 kWh**. Esta energía se considera pura ya que saldrá de una sola fuente energética (el combustible fósil) y será transformada en mecánica y eléctrica, sin contar regeneración.

La siguiente tabla resume el proceso para convertir esa energía en cantidad de combustible fósil:

Tabla 51. Cálculo de la cantidad de combustible

Tipo de combustible	Rendimiento del tipo de motor [%]	Energía necesaria del combustible [kWh]	PCI [Gj/t]	Cantidad de combustible [t]
Diésel	32	24353,13	42,4	2,07
GLP	35	22265,71	45,5	1,76

4.7.4. Metro

4.7.4.1. Tracción eléctrica

Para la validación de los resultados de la simulación eléctrica del metro L5 de Barcelona se toman los siguientes requerimientos:

4.7.4.1.1.1 Tensión en catenaria

La tensión en catenaria deberá mantenerse dentro de los valores seguros de funcionamiento, que se encuentran descritos en la normativa proporcionada por ADIF:

- Máxima tensión en catenaria: 900 Vdc
- Máxima tensión de regeneración: 900 Vdc
- Tensión nominal: 750 Vdc

- Mínima tensión en catenaria: 500 Vdc

4.7.4.1.1.2 Tensión Carril-Tierra

En la norma EN 50122-1 se especifican los valores máximos de tensión carril-tierra, tanto RMS 5 minutos como en continua:

- Operación normal: 50 Vdc (RMS 300s)
- Operación normal: 160 Vdc (instantánea)

4.7.4.1.1.3 Carga de los rectificadores

Los rectificadores son capaces de soportar períodos de sobrecarga establecidos en la IEEE 1653.2 (Para transformadores de tracción) y en la IEEE C57.18.10 (Para rectificadores de tracción). En acorde a estas normas, las sobrecargas máximas de los grupos de tracción son las siguientes:

- 100% de corriente de carga en continuo
- 150% de corriente de carga por períodos de dos (2) horas
- Cinco períodos del 300% de corriente de carga durante 1 minuto, en el período de dos horas.
- Un período del 450% de la corriente de carga por 15 segundos, en el período de dos horas.

Se tiene en cuenta que, al decir corriente, se refiere también a potencia ya que son proporcionales.

A continuación, la tabla resumen de valores de la simulación y normativa:

P_n (Potencia nominal) = 2.250 kW por rectificador

Tabla 52. Comprobación de la normativa

Parámetro	Valor Simulación	Requerimiento normativa
Tensión mínima en catenaria instantánea	685,53 V	500 V
Tensión permanente mínima en catenaria RMS 10'	782,436 V	500 V
Tensión carril-tierra máxima instantánea (1s)	62,716 V	160 V
Tensión carril tierra RMS 5'	21,388 V	50 V

Potencia máxima de un grupo de tracción instantánea	≈4.900 V	<4,5*Pn (15s)
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 5'	≈1.950 V	<3*Pn (1min)
Potencia máxima de un grupo de tracción 15'	≈1.750 V	<1,5*Pn (2h)
Potencia máxima de un grupo de tracción RMS 2h	≈1.400 V	<1*Pn (Permanente)

Vemos que nos encontramos también dentro de los rangos admisibles de tensión. En cuanto a las potencias, que se han comparado de igual manera que en los otros apartados, y teniendo en cuenta que los grupos son de 4.500 kW, se cumple también la restricción de sobrecarga en los grupos de tracción.

4.7.4.2. Tracción por baterías/Pilas de hidrógeno

Pasando a hablar sobre la simulación de baterías en el Metro, podemos ver en los resultados que también estamos cercanos al punto óptimo, pero en este caso se ha dejado un poco de margen ya que las subestaciones de tracción se encuentran más separadas y un metro es muy probable que tenga que esperar más rato del habitual, o quedar parado a mitad de recorrido, etc. Por eso vemos que el estado mínimo de la simulación es del 40 % aproximadamente, si bien los ciclos siguen siendo de un 20 % aproximadamente.

Entonces la capacidad de 100 kWh seleccionada para los materiales rodantes podría llegar a ser un poco inferior, pero siempre está bien trabajar con un cierto margen para imprevistos.

En cuanto a las pilas de hidrógeno, calculamos de la misma manera la cantidad necesaria de hidrógeno a partir de la energía de 6.285 kWh:

$$\frac{6285 \text{ kWh}}{\text{Sim}} * \frac{1000 \text{ Wh}}{1 \text{ kWh}} * \frac{3600 \text{ J}}{1 \text{ Wh}} * \frac{1 \text{ e} -}{1,602177 \text{ E} - 19 \text{ J}} * \frac{1 \text{ molécula H}_2}{2 \text{ e} -} * \frac{1}{0,5} \\ * \frac{1 \text{ mol H}_2}{6,022 \text{ E} 23 \text{ moléculas H}_2} * \frac{2,01588 \text{ g H}_2}{1 \text{ mol H}_2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 472,74 \text{ kg H}_2$$

4.7.4.3. Tracción por diésel/GLP

Como se comenta en la sección anterior, se ha realizado la simulación únicamente con OpenTrack y la demanda energética pura ha sido de **6.375 kWh**. Esta energía se considera pura ya que saldrá de una sola fuente energética (el combustible fósil) y será transformada en mecánica y eléctrica, sin contar regeneración.

La siguiente tabla resume el proceso para convertir esa energía en cantidad de combustible fósil:

Tabla 53. Cálculo de la cantidad de combustible

Tipo de combustible	Rendimiento del tipo de motor [%]	Energía necesaria del combustible [kWh]	PCI [Gj/t]	Cantidad de combustible [t]
Diésel	32	19921,88	42,4	1,69
GLP	35	18214,29	45,5	1,44

4.8. Obtención de ratios características de cada tecnología con cada servicio

En este apartado se pretende obtener unas ratios que nos ayuden a comparar todos los sistemas y tecnologías, así como saber más o menos por donde irán los números a la hora de afrontar una nueva simulación.

Las ratios más representativas que se pueden obtener serían:

- Ratio de energía por cada kilómetro de la línea y por cada día de operación [MWh/(km*día)]
- Ratio de combustible consumido por cada kilómetro de línea y por cada día [(kg)/(km*día)]

A continuación, se adjunta una tabla resumen de todos los datos necesarios para calcular las ratios y con el resultado de las mismas (verde):

Tabla 54. Tabla resumen del cálculo de las ratios energéticas

Tipo de servicio	Tipo de tecnología	Energía necesaria [kWh]	Cantidad combustible [kg]	Tiempo de simulación [h]	Longitud de la línea [km]	Ratio de energía [MWh/(km*día)]	Ratio de combustible [kg/(km*día)]
Alta velocidad	Eléctrica	41.597,00		1,00	230,30	4,33	
Regional	Eléctrica	13.092,00		3,00	78,00	1,34	
	Diésel	44.765,63	3.800,00			4,59	389,74
	GLP	40.928,57	3.240,00			4,20	332,31
	Baterías	12.437,40				1,28	
	Pilas H2	12.437,40	935,50			1,28	95,95
Tranvía	Eléctrica	5.487,00		2,00	10,90	6,04	
	Diésel	24.353,13	2.070,00	3,00		17,87	1.519,27
	GLP	22.265,71	1.760,00			16,34	1.291,74
	Baterías	7.960,00				5,84	
	Pilas H2	7.960,00	598,73			5,84	439,43
Metro	Eléctrica	6.120,00		1,15	18,70	6,83	
	Diésel	19.921,88	1.690,00			22,23	1.886,07
	GLP	18.214,29	1.440,00			20,33	1.607,07
	Baterías	6.285,00		1,00		8,07	
	Pilas H2	6.285,00	472,74			8,07	606,73

4.9. Comparativa técnica de los tipos de servicio para cada tecnología

Se realizará la comparativa separando cada tipo de tecnología de tracción y comparándola con todos los tipos de servicio:

4.9.1. Tracción eléctrica

La tracción eléctrica da unas ratios muy bajas en todos los casos, puesto que es la más usada, más optimizada y mejor implementada en el sistema actual de transporte ferroviario.

No obstante, encontramos su mínimo en los trenes regionales. Esto es debido a que encontramos un tren cada 20 – 15 minutos aproximadamente y son de potencia media.

El segundo más bajo, aunque parezca mentira, es el de alta velocidad. Aunque los trenes son de alta potencia, se suelen hacer en tramos muy planos que requieren poco esfuerzo en subidas y salen trenes con menos frecuencia.

Por último, tenemos el tranvía y el metro, siendo la ratio del metro ligeramente superior. Esto ocurre ya que aparece un tren cada 3-5 minutos y la malla se llena mucho, subiendo el consumo energético. Otra razón de estas diferencias es la longitud, ya que el metro y tranvía son unas distancias muy cortas en comparación con los otros y eso hace al sistema menos eficiente.

4.9.2. Tracción por combustible diésel y GLP

Lo primero que comentar de estas tecnologías es el hecho de que la energía primaria necesaria será mucho mayor que la eléctrica, ya que el rendimiento de estos motores es muy inferior al del motor eléctrico.

Entre diésel o GLP, todos los valores obtenidos para los GLP son ligeramente inferiores a los de diésel, ya que el motor de GLP suele ser más eficiente.

Entre los tipos de servicio, hay que destacar que para el tren regional las ratios salen mucho más inferiores que para tranvía o metro, por lo que sería mucho más factible usar motores de combustión en trenes regionales que en tranvías o Metros.

Además, teniendo en cuenta que los tranvías pasan todo su recorrido en ciudad y que los Metros van bajo tierra el tema de la salida de gases daría muchos problemas.

Las cantidades de combustible, por su parte, son moderadas en el tren regional (del orden de 300 kg por km y por día) pero en el tranvía o el Metro acaban siendo desorbitadas.

4.9.3. Tracción por baterías

Para las baterías, las ratios son prácticamente iguales que las de tracción eléctrica, siendo ligeramente inferiores en trenes regionales o tranvía y ligeramente superiores en el metro. Aun así, todas las ratios de baterías son moderadas y podrían ser implementadas, siendo muy útiles para la incorporación de energías renovables, excepto para el tren regional que se han hecho muchas estimaciones ya que la simulación no ha ido como debería.

4.9.4. Tracción por pilas de hidrógeno

En cuanto a las ratios de la tracción por hidrógeno, las que se refieren a la energía son las mismas que en el apartado anterior ya que se estimó en un principio que la simulación sería común a ambas.

Pero si nos fijamos en las ratios de combustible, vemos que rondan los 300-600 kg de hidrógeno cada día y quilómetro, excepto en el tren regional que, aunque la simulación no sea concluyente ha dado de 95 kg cada día y cada quilómetro.

4.10. Conclusiones del estudio energético

Una vez finalizado en el estudio energético y calculadas todas las ratios, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

La tracción eléctrica, a día de hoy, es la más eficaz y mejor implementada, por lo que sería la primera opción en todos los casos.

Los combustibles fósiles pueden ir bien para trenes regionales, pero no son indicados para trenes urbanos como el tranvía, el metro o el monorraíl.

El uso de baterías podría llegar a ser posible en tranvías o metro, pero teniendo la tracción eléctrica al lado solo se escogería esta última por temas de energías renovables o zonas donde no se pueda instalar catenaria.

La energía de las pilas de hidrógeno no es muy conocida y cuesta mucho obtener el combustible que usan, por lo que el uso de éstas, de momento, no es aconsejable a ningún nivel.

5. Estudio medioambiental de las diferentes tecnologías para la tracción ferroviaria

5.1. Estimación de las emisiones de cada tecnología con cada tipo de servicio

Para estimar las emisiones de CO₂ cada tipo de tecnología, se considerarán los siguientes puntos:

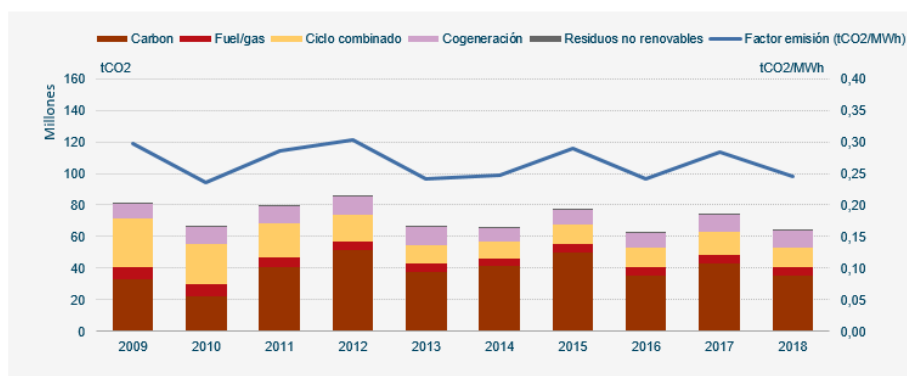
- Las emisiones de las pilas de hidrógeno serán nulas, puesto que solo liberan H₂O y O₂.
- Las emisiones de Diésel y GLP serán las emisiones características de cada uno de ellos en su combustión.
- Para las Baterías y la tracción eléctrica, se cogerá la energía que viene de las subestaciones (Sin contar la regeneración) y se considerará que toda viene de España, por lo que se tendrá en cuenta el factor de emisiones medio de 2018 proporcionado por la REE (Red Eléctrica Española):



El Sistema Eléctrico Español
Informe 2018

Producción de energía eléctrica

Emisiones y factor de emisión de CO₂ asociado a la generación de energía eléctrica nacional ⁽¹⁾



⁽¹⁾ Incluye Península, Islas Baleares, Islas Canarias, Ceuta y Melilla.

Figura 48. Emisiones medias de la generación española [4]



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

5.2. Obtención de las ratios de emisiones de cada tecnología con cada tipo de servicio

La tabla que vemos a continuación resume todos los parámetros a usar, así como los resultados de emisiones de CO₂ de las diferentes tecnologías:

Tabla 55. Tabla resumen de las ratios de emisiones de CO₂

Tipo de servicio	Tipo de tecnología	Energía necesaria [kWh]	Emisiones específicas [tCO2/MWh]*	Tiempo de simulación [h]	Longitud de la línea [km]	Ratio emisiones [tCO2/(km*día)]
Alta velocidad	Eléctrica	41.597,00	0,25	1	230,3	1,084
Regional	Eléctrica	13.092,00	0,25	3,00	78,00	0,336
	Diésel	44.765,63	0,27			1,218
	GLP	40.928,57	0,24			0,993
	Baterías	12.437,40	0,25			0,319
Tranvía	Eléctrica	5.487,00	0,25	2,00	10,90	1,510
	Diésel	24.353,13	0,27	3,00		4,742
	GLP	22.265,71	0,24			3,865
	Baterías	7.960,00	0,25			1,461
Metro	Eléctrica	6.120,00	0,25	1,15	18,70	1,708
	Diésel	19.921,88	0,27			5,899
	GLP	18.214,29	0,24			4,808
	Baterías	6.285,00	0,25	1,00		2,017

*Como aclaración, puede parecer que las emisiones específicas eléctricas y de los combustibles fósiles sean muy parecidas, pero no lo son ya que las de electricidad y baterías van referidas a energía eléctrica producida, mientras que las de los combustibles fósiles van referidas a la energía térmica consumida del combustible.

5.3. Comparativa del impacto ambiental entre las diferentes tecnologías y servicios

Con las ratios de emisiones comprobamos, aunque ya se sabía de antemano, que la tracción eléctrica contamina unas 4 veces menos que la tracción por combustible fósil. También vemos que las emisiones de CO₂ del GLP son ligeramente inferiores al Diésel, por lo que en principio sería preferible en temas medioambientales.

Conforme a los servicios, el menos contaminante en emisiones de CO₂ es el tren regional por su baja frecuencia de paso. EL segundo sería el de alta velocidad y los más contaminantes el tranvía y el metro, siendo el tranvía ligeramente inferior. Esto es debido a la 'baja eficacia' de realizar recorridos tan cortos con una alta frecuencia de paso de los trenes.

No obstante, no estamos teniendo en cuenta otros factores ambientales como por ejemplo tala de bosques, invasión de zonas naturales o impactos paisajísticos. En estos casos los trenes sin catenaria suelen ser más respetuosos ya que se evitan instalar catenaria, subestaciones, acometidas y otros elementos que puedan modificar el medioambiente.

5.4. Conclusiones del estudio medioambiental de las tecnologías

Concluimos del análisis económico que, si buscamos reducir al máximo las emisiones, se debe hacer uso de tracción eléctrica o incluso de la tracción por baterías con la posibilidad del uso 100% renovable.

Las pilas de hidrógeno serían también una solución de 0 emisiones, pero no están muy bien implementadas.

Si lo que buscamos es reducir el impacto medioambiental, entonces cabe la posibilidad de optar por la tracción sin catenaria ni subestaciones eléctricas, que vendrían a ser los combustibles fósiles.

6. Estudio económico de las diferentes tecnologías para la tracción ferroviaria

6.1. Aproximación de costes de los elementos implicados (Baterías, cables, combustibles...)

Para la aproximación de los costes de los elementos, a parte de la búsqueda de precios comerciales de gasóleo, GLP, electricidad, etc, se consultará el banco de precios accesible en la empresa para consultar costes de elementos más complicados de encontrar como catenaria o subestaciones, pero por temas de confidencialidad no se puede mostrar la fuente y los precios han sido arredondeados.

Tabla 56. Tabla resumen de los costes de elementos de las simulaciones

Elemento	Coste
Catenaria (Postes, contacto, sustentador,...)	≈3.400 €/km
Subestación de alterna 25.000 V	≈3.000.000 €/unidad
Subestación de continua 3.000 V	≈2.000.000 €/unidad
Subestación de continua de 750 V	≈1.000.000 €/unidad
Punto de carga de baterías	≈500.000 €/unidad
Baterías de Ion-Litio	≈130 €/kWh
Pilas de combustible	≈200 €/kWh [7]
Coste Diésel	≈1,24 €/kg [6]
Coste GLP	≈1,16 €/kg [6]
Coste Hidrógeno	≈10 €/kg [5]
Coste electricidad	≈0,205 €/kWh

Material rodante Regional y Alta Velocidad (media) (con motor incluido)	≈120.000 €/unidad
Material rodante tranvía y metro (media) (con motor incluido)	80.000 €/u
Elementos de seguridad y carriles	≈800 €/km

6.2. Obtención de ratios de coste de cada tecnología con cada tipo de servicio

En las dos páginas horizontales que encontramos a continuación podemos ver un desglose de todos los precios mencionados en el apartado anterior con sus parámetros de cálculo y finalmente el cálculo de las ratios.

Para hacerlo más representativo, se han obtenido dos ratios diferentes: Una referida al coste de instalación de todos los elementos por cada kilómetro y otra referida al coste de operar la línea por cada kilómetro y por cada día.

Tabla 57. Parte 1 de la tabla resumen de las ratios económicas

Tipo de servicio	Tipo de tecnología	Tiempo de simulación [h]	Longitud de la línea [km]	Precio de la catenaria [€/km]	Precio elementos de seguridad y carriles [€/km]	Cantidad de combustible [kg] o energía eléctrica [kWh]	Precio del combustible [€/kg] o energía eléctrica [€/kWh]	Cantidad de materiales rodantes en circulación [u]	Precio de los materiales rodantes [€/u]
Alta velocidad	Eléctrica	1,00	230,30	3.400,00	800,00	41.597,00	0,205	15,00	120.000,00
Regional	Eléctrica	3,00	78,00			13.092,00	0,205	10,00	
	Diésel					3.800,00	1,240		
	GLP					3.240,00	1,160		
	Baterías					12.437,40	0,205		
	Pilas H2					935,50	10,000		
Tranvía	Eléctrica	2,00	10,90			5.487,00	0,205	15,00	80.000,00
	Diésel	3,00				2.070,00	1,240		
	GLP					1.760,00	1,160		
	Baterías					7.960,00	0,205		
	Pilas H2					598,73	10,000		
Metro	Eléctrica	1,15	18,70			6.120,00	0,205	12,00	
	Diésel					1.690,00	1,240		
	GLP					1.440,00	1,160		
	Baterías	6.285,00				0,205			
	Pilas H2	472,74				10,000			

Tabla 58. Parte 2 de la tabla resumen de las ratios económicas

Tipo de servicio	Tipo de tecnología	Cantidad de subestaciones o puntos de carga [u]	Precio de las subestaciones o puntos de carga [€/u]	Capacidad media de las baterías o pilas de hidrógeno [kWh]	Precio de las baterías o pilas de hidrógeno [€/kWh]	Ratio económica de instalación [€/km]	Ratio económica de operación [€/(km*día)]
Alta velocidad	Eléctrica	5,00	3.000.000,00			77.148,33	888,65
Regional	Eléctrica	6,00	2.000.000,00			173.430,77	275,27
	Diésel					16.184,62	483,28
	GLP					16.184,62	385,48
	Baterías	6,00	500.000,00	1.021,00	130,00	71.662,82	261,50
	Pilas H2			1.021,00	200,00	42.364,10	959,49
Tranvía	Eléctrica	8,00	1.000.000,00			848.236,70	1.238,35
	Diésel					110.891,74	1.883,89
	GLP					110.891,74	1.498,42
	Baterías	8,00	500.000,00	70,00	130,00	490.387,16	1.197,65
	Pilas H2			70,00	200,00	130.157,80	4.394,35
Metro	Eléctrica	9,00	1.000.000,00			536.820,32	1.400,16
	Diésel					52.136,90	2.338,73
	GLP					52.136,90	1.864,20
	Baterías	9,00	500.000,00	100,00	130,00	301.120,86	1.653,59
	Pilas H2			100,00	200,00	64.971,12	6.067,25

6.3. Comparativa económica de las diferentes tecnologías con cada tipo de servicio

En cuanto hace a las ratios de instalación de las diferentes tecnologías, la eléctrica es la más cara por mucha cantidad, ya que contiene todos los elementos descritos (subestaciones, catenaria, trenes, etc). La segunda más cara en todos los casos es la tracción por baterías debido a la instalación de puntos de carga y el hecho de que los trenes tienen que llevar baterías, que suelen ser caras. En tercer lugar, las pilas de hidrógeno, que, al no tener catenaria ni puntos de carga, solo se cuenta el coste de las mismas pilas. Por último, los combustibles fósiles son los más baratos en su instalación, teniendo en cuenta que no se instala ni catenaria, ni subestaciones, ni elementos extra en los trenes.

Por otro lado, las ratios de operación cambian respecto al punto anterior. La tecnología más barata de operar sería la de baterías, seguida muy de cerca por la eléctrica, ya que obtienen la energía de la misma fuente: Red Eléctrica Española. En cuanto a los combustibles fósiles el GLP es el más económico de los dos, pero tanto este como el diésel son bastante más costosos que la energía eléctrica. En último lugar encontramos operar con pilas de hidrógeno, en las cuales el precio se dispara hasta 4 veces más que los combustibles fósiles.

En cuanto a los sistemas de tracción, en general, el tren de Alta velocidad encuentra la ratio más baja de instalación mientras que su coste de operación es mucho más alto que por ejemplo el del tren regional. El tren regional, a su vez, tiene las ratios de operación más bajas y las segundas ratios de instalación más bajas. En último lugar y muy cercanas se encuentran las simulaciones de tranvía y metro que, aunque pueda sorprender, son las más caras en todos los aspectos. Eso es debido a que las ratios están calculadas por km y las líneas de tranvía o metro suelen ser muy cortas, pero con mucha densidad de subestaciones, mientras que si vamos aumentando de tensión vemos que las líneas se vuelven más largas y con menos densidad de subestaciones.

6.4. Conclusiones del estudio económico

Podemos concluir del estudio económico que en temas de instalación lo más barato posible son la tracción por combustibles fósiles o con almacenamiento de energía, pero estos pasan a ser los más caros a la hora de operar y, además, las que tienen almacenamiento de energía deben renovar sus celdas cada 5-10 años aproximadamente.

La energía eléctrica es la más barata de operar, pero la más cara de instalar, por lo que tiene el balance perfecto que muchas veces se busca.

Las pilas de hidrógeno son demasiado caras de operar y solo se optaría por esta opción en situaciones muy específicas y puntuales.

Por último, se concluye que a niveles generales las ratios de operación e instalación de un tranvía o un metro llega a ser mucho más cara que los demás debido a que están divididas por kilómetro, pero si se calculara el coste real de instalación el metro y el tranvía son, efectivamente, las más baratas.



Conclusiones

Analizando generalmente todos los puntos discutidos en el proyecto, se concluye que:

Los simuladores OpenTrack y OpenPowerNet son unas herramientas precisas de cálculo y han sido imprescindibles a la hora de realizar el trabajo, a pesar de haber tenido algún pequeño error de cálculo.

Actualmente los 5 transportes ferroviarios más usados son la Alta Velocidad, el cercanías, el metro el tranvía y el monorraíl, y las 5 posibles formas de traccionarlas serían la electricidad, las baterías, el diésel, el GLP o las pilas de hidrógeno.

Referente a la energía y la parte técnica, la electricidad es la mejor, compitiendo con los combustibles fósiles muy de cerca y muy lejos de la tracción por baterías y aún más de la tracción por pilas de hidrógeno. Los combustibles fósiles serían más indicados para trenes regionales mientras que las baterías para tranvía o metro.

En cuanto a emisiones, nada nuevo, los más contaminantes son los combustibles fósiles que, a su vez, son los que menos modificación del paisaje aportan.

Pasando a temas económicos, la tracción eléctrica y las baterías parecen estar recomendadas para la operación mientras que los combustibles fósiles para la instalación y las pilas de hidrógeno no recomendables. Por último, un dato curioso es que el coste de los tranvías o metros por kilómetro parece ser mucho mayor que el de las líneas regionales e incluso de alta velocidad.

Análisis económico

Para el cálculo del coste real de realización de este proyecto se adjunta una tabla a modo de resumen y se indica finalmente el coste total de realizar el proyecto:

Tabla 59. Tabla resumen de los costes de realización del proyecto

Elemento	Precio	Medición
Ordenador de torre	1.000 €/u	2 unidades
Ordenador portátil	700 €/u	1 unidad
Simulador	200.000 €/u	1 unidad
Costes de ingeniería (ingeniero junior)	21 €/h	600 horas
Energía eléctrica	0,425 €/kWh	80 kWh

Finalmente, el coste teórico, contando con comprar desde 0 todos los elementos, asciende a: 215.334 € (DOSCIENTOS QUINCE MIL TRESCIENTOS TREINTA Y CUATRO)

Bibliografía

Documentación consultada

[1] Institut für Bahntechnik GmbH. OpenPowerNet User Manua. Branch Office Dresden: 2019.

Páginas web consultadas

[2]<https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>

[3]<https://www.railwayinnovationhub.com/bombardier-desarrollara-en-consorcio-el-proyecto-de-monorail-de-el-cairo/>

[4]<https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/informe-anual-sistema/informe-del-sistema-electrico-espanol-2018>

[5]<https://www.drivingeco.com/recargar-coche-hidrogeno/>

[6]<https://www.ircongas.com/precios-autogas-glp/>

[7]<https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/pila-combustible-73990.html>